

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL ECUADOR-MATRIZ

FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVAS Y CONTABLES

**TESIS DE MAGÍSTER EN ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS CON
MENCIÓN EN GERENCIA DE LA CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD**

**DESARROLLO DE METODOLOGÍA SEIS SIGMA COMO APOYO A
LA MEJORA CONTINUA DE PROCESOS EN LA PEQUEÑA Y
MEDIANA EMPRESA NACIONAL**

ING. BOLÍVAR RAÚL CÓNDOR SALAZAR

DIRECTOR: ING. RODRIGO SALTOS MOSQUERA, MBA.

QUITO, 2015

DIRECTOR:
Ing. Rodrigo Saltos Mosquera, MBA.

INFORMANTES:
Ing. Mariano Merchán Fossati, MBA.
Ing. Álvaro Burgos Yáñez, MSc.

DEDICATORIA

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador,
querida Institución que ha hecho posible la
ejecución de este trabajo.

A mi familia, especialmente a mis hijas, que han
tenido la generosidad de darme el tiempo que les
corresponde para poder dedicarlo a terminar
esta tesis de Maestría.

AGRADECIMIENTO

Al personal de OFITEK que se dedicó a tiempo completo a desarrollar los experimentos que son la conclusión necesaria del trabajo teórico.

INDICE

RESUMEN EJECUTIVO	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. FORMULACIÓN, OBJETIVOS, JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	4
1.1. FORMULACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	6
1.3.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE ÍNDOLE EXTERNA.....	6
1.3.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE ÍNDOLE INTERNA.....	14
1.3.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	19
2. LA CULTURA SEIS SIGMA Y LAS PYMES.....	25
2.1. MARCO TEÓRICO.....	25
2.1.1. LOS SISTEMAS DE GESTIÓN.....	25
2.1.2. LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD.....	27
2.1.3. LA GESTIÓN POR PROCESOS Y LA MEJORA CONTINUA.....	30
2.1.4. METODOLOGÍAS RELACIONADAS CON LA GESTIÓN POR PROCESOS..	31
2.1.5. VENTAJAS DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA.....	33
2.2. INTRODUCCIÓN A SEIS SIGMA.....	37
2.2.1. LA HISTORIA.....	38
2.2.2. SEIS SIGMA, CALIDAD Y BALANCED SCORECARD.....	40
2.2.3. SEIS SIGMA, TQM, TPS Y LEAN PRODUCTION.....	42
2.2.4. PROCESOS, ACTIVIDADES Y TAREAS.....	44
2.2.5. DEFECTOS Y COSTO DE LA CALIDAD.....	47
2.2.6. EL EQUIPO SEIS SIGMA.....	49
2.2.7. CONDICIONES PARA EL ÉXITO.....	51

2.3. EL ENFOQUE AL CLIENTE.....	53
2.3.1. LAS CTQ Y VOC.....	53
2.3.2. VALOR AGREGADO.....	55
2.3.3. SEIS SIGMA Y EL DISEÑO DE NUEVOS PRODUCTOS.....	56
2.3.4. EL MODELO KANO.....	58
2.4. SEIS SIGMA Y EL MÉTODO CIENTÍFICO.....	61
2.4.1. EL MÉTODO CIENTÍFICO Y EL PROTOCOLO DMAIC.....	62
2.4.2. LAS HERRAMIENTAS QUE USA SEIS SIGMA.....	64
2.5. DESARROLLO DE PROYECTOS SEIS SIGMA.....	67
2.5.1. SELECCIÓN DE LOS PROYECTOS SEIS SIGMA.....	69
2.5.2. DIAGRAMA SIPOC.....	70
2.5.3. DESPLIEGUE DE LA CALIDAD - ANÁLISIS QFD.....	72
2.5.4. SECUENCIA DE DESARROLLO DE UN PROYECTO SEIS SIGMA.....	75
2.6. LA CULTURA SEIS SIGMA Y LAS PYMES.....	76
2.6.1. EL CAMBIO CULTURAL.....	76
2.6.2. FACTIBILIDAD DE SEIS SIGMA PARA LAS PYMES.....	79
2.6.3. TAMAÑO Y SITUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PYMES EN EL ECUADOR.....	81
2.6.4. NIVEL PROFESIONAL DE LOS DIRECTIVOS DE LAS PYMES.....	84
2.6.5. PRESENCIA DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA EN EL ECUADOR.....	87
3. BASES ESTADÍSTICAS DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA.....	94
3.1. LA MÉTRICA SEIS SIGMA Y LA VARIABILIDAD.....	94
3.1.1. IMPORTANCIA DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL.....	95
3.1.2. LA CAMPANA DE GAUSS.....	97
3.1.3. NORMALIDAD Y EL TEOREMA DEL LÍMITE CENTRAL.....	101
3.1.4. VARIABILIDAD, CAUSAS COMUNES Y CAUSAS ESPECIALES.....	103
3.1.5. LOS NIVELES SEIS SIGMA.....	107
3.1.6. TIPOS DE DATOS USADOS, ASIMETRÍA Y NORMALIZACIÓN.....	112

3.1.7. TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	120
3.1.7.1. Muestreo de Procesos.....	121
3.1.7.2. Muestreo de Poblaciones Estáticas Finitas.....	124
3.1.7.3. Muestreo de Poblaciones Estáticas Infinitas.....	129
3.1.7.4. Recomendaciones respecto del margen de error (E).....	131
3.1.7.5. Recomendaciones respecto del Tamaño de la Muestra.....	132
3.1.8. OBTENCIÓN DE LOS DATOS.....	133
3.1.8.1. Tipos de Muestras.....	133
3.1.8.2. Métodos de Recolección de Datos.....	136
3.2. CONCEPTOS ESTADÍSTICOS RELEVANTES PARA SEIS SIGMA.....	136
3.2.1. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD USADAS POR SEIS SIGMA.....	137
3.2.1.1. Distribuciones Discretas relacionadas con la Distribución Normal.....	138
3.2.1.2. Distribuciones Continuas relacionadas con la Distribución Normal.....	141
3.2.1.3. Estimadores Puntuales e Intervalos de Confianza.....	143
3.2.2. CARACTERÍSTICAS Y USO EN SEIS SIGMA DE LAS DISTRIBUCIONES NORMAL, χ^2 , t y F.....	146
3.2.2.1. Características y uso de la Distribución Normal – Error Muestral.....	146
3.2.2.2. Características y uso de la Distribución Chi Cuadrado.....	158
3.2.2.3. Características y uso de la Distribución t de Student.....	166
3.2.2.4. Características y uso de la Distribución F.....	169
3.2.3. PRUEBAS DE HIPÓTESIS.....	172
3.2.3.1. Significancia observada vs. Significancia predefinida: p-value.....	178
3.2.3.2. Pruebas de Hipótesis para una muestra.....	181
3.2.3.3. Pruebas de Hipótesis para dos muestras.....	184

3.2.3.4. Pruebas para más de dos muestras: ANOVA.....	188
3.2.3.5. Prueba LSD.....	192
3.2.3.6. Métodos Gráficos para diferencias significativas.....	194
3.2.4. DIAGRAMAS O CARTAS DE CONTROL USADAS POR SEIS SIGMA.....	197
3.2.4.1. Cartas $\bar{X} - R$	199
3.2.4.2. Cartas $\bar{X} - S$	206
3.2.4.3. Cartas p.....	210
3.2.4.4. Cartas C y U.....	211
3.2.5. CAPACIDAD DE LOS PROCESOS.....	213
3.3. SEIS SIGMA Y EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	222
3.3.1. GENERALIDADES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	222
3.3.2. EL DISEÑO FACTORIAL 2^k Y SUS REGLAS.....	223
4. PROYECTO DESARROLLADO EN UNA PYME DE QUITO.....	236
5. AULA VIRTUAL, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	288
5.1. CONSIDERACIONES Y ALCANCE DEL DISEÑO DE UN AULA VIRTUAL PARA CAPACITACIÓN SEIS SIGMA.....	288
5.2. CONCLUSIONES.....	289
5.3. RECOMENDACIONES.....	293
BIBLIOGRAFÍA.....	299
ANEXOS.....	303

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Productividad relativa del trabajo América Latina vs. EE UU.....	8
Figura 2	Productividad media del trabajo como porcentaje del índice de EE UU.....	8
Figura 3	Productividad del trabajo por rama de actividad en el Ecuador.....	9
Figura 4	Factores que influyen en la productividad.....	10
Figura 5	Factores que se oponen a la facilidad de hacer negocios.....	11
Figura 6	Tiempos normales para alcanzar niveles Seis Sigma.....	45
Figura 7	Estructura de un proceso.....	46
Figura 8	Estructura de un sistema.....	47
Figura 9	Costo de la calidad como porcentaje del ingreso.....	48
Figura 10	Expectativas de los clientes.....	58
Figura 11	Modelo Kano.....	59
Figura 12	Fases del método científico.....	63
Figura 13	Protocolo DMAIC.....	63
Figura 14	Selección de proyectos Seis Sigma.....	70
Figura 15	Diagrama SIPOC.....	71
Figura 16	Despliegue de la función de la calidad.....	73
Figura 17	QFD para un artefacto.....	75
Figura 18	Secuencia en la selección de un proceso Seis Sigma.....	76
Figura 19	Formación académica de los empleados de las PYMES.....	84
Figura 20	Formación académica del máximo directivo de la empresa.....	86
Figura 21	Distribución normal de probabilidad.....	98
Figura 22	Evidencia en curva normal de la mejora de un proceso.....	100
Figura 23	Distribución de frecuencias de datos aleatorios.....	101
Figura 24	Distribución de frecuencias de datos aleatorios promediados (10).....	102
Figura 25	Distribución de frecuencias de datos aleatorios promediados (20).....	102
Figura 26	La variabilidad según Seis Sigma.....	104
Figura 27	Variabilidad de las 6 Ms.....	105
Figura 28	Fases para reducir la variabilidad.....	106
Figura 29	Curva Z y especificación.....	108
Figura 30	Deriva de un proceso.....	109
Figura 31	Desplazamiento de las medias.....	112
Figura 32	Histograma de datos no normales asimétricos.....	116
Figura 33	Box-Cox.....	117
Figura 34	Histograma de datos normalizados con Box-Cox.....	118
Figura 35	Calificación de normalidad.....	119
Figura 36	Tamaño de muestras para medición diaria.....	121
Figura 37	Tamaño de muestra para medición semanal.....	122
Figura 38	Intervalo de confianza del 95%.....	126
Figura 39	Confianza y error para Z y para t.....	145
Figura 40	Casos de histogramas de datos a la salida de procesos.....	148
Figura 41	Área bajo la curva normal.....	151
Figura 42	Distribución normal estandarizada.....	152
Figura 43	Ejemplo de cálculo de probabilidad.....	152
Figura 44	Intervalo de la media muestral alrededor de μ	154
Figura 45	Intervalo de la media poblacional alrededor de \bar{X}	155
Figura 46	Carta de control de medias.....	157
Figura 47	Familia de curvas Chi Cuadrado.....	160
Figura 48	Familia de curvas t de Student.....	167
Figura 49	Intervalo de la media poblacional alrededor de \bar{X} con t de Student.....	168
Figura 50	Familia de curvas F.....	170

Figura 51	Hipótesis bilateral.....	174
Figura 52	Hipótesis Unilateral.....	175
Figura 53	Valor-P (p-value).....	180
Figura 54	ANOVA: proceso con un factor de entrada.....	188
Figura 55	Gráfico de medias utilizando LSD.....	195
Figura 56	Diagrama simultáneo de cajas.....	196
Figura 57	Diagrama de pódium.....	197
Figura 58	Diagrama de control típico.....	199
Figura 59	Estabilidad respecto de las medias y los rangos.....	202
Figura 60	Causas de inestabilidad de un proceso.....	209
Figura 61	Límites naturales de un proceso con poca holgura.....	215
Figura 62	Límites naturales de un proceso con bastante holgura.....	216
Figura 63	Proceso descentrado respecto de las especificaciones.....	218
Figura 64	Diseño Factorial 2K.....	223
Figura 65	Gráficos de interacciones.....	227
Figura 66	Interacción imprimante – antioxidante.....	228
Figura 67	Interacciones principales imprimante y antioxidante.....	229
Figura 68	Normalidad de residuos.....	234
Figura 69	Análisis de varianza constante.....	235
Figura 70	Análisis de independencia.....	235
Figura 71	Productos de Ofitek.....	236
Figura 72	Causas de daño en la pintura.....	238
Figura 73	Flujograma del proceso de pintura.....	240
Figura 74	Medición de la adherencia.....	241
Figura 75	Medición de la adherencia.....	242
Figura 76	Cartas \bar{X} – R. Lacas de secamiento al ambiente.....	244
Figura 77	Cartas \bar{X} – R. Lacas martilladas de secamiento al ambiente.....	245
Figura 78	Cartas \bar{X} – R. Pintura líquida horneable.....	245
Figura 79	Cartas \bar{X} – R. Pintura electrostática.....	246
Figura 80	Normalidad de lacas de secamiento al ambiente.....	247
Figura 81	Capacidad de proceso. Lacas de secamiento al ambiente.....	248
Figura 82	Normalidad de lacas martilladas de secamiento al ambiente.....	248
Figura 83	Capacidad de proceso. Lacas martilladas de secamiento al ambiente.....	249
Figura 84	Normalidad de pintura líquida horneable.....	249
Figura 85	Capacidad de proceso. Pintura líquida horneable.....	250
Figura 86	Normalidad de pintura electrostática.....	250
Figura 87	Capacidad de proceso. Pintura electrostática.....	251
Figura 88	Factores de entrada. Lacas de secamiento al ambiente.....	254
Figura 89	Diagrama de Ishikawa. Lacas de secamiento al ambiente.....	255
Figura 90	Diseño factorial 2^K . Lacas de secamiento al ambiente.....	256
Figura 91	Factores de entrada. Pinturas horneables.....	257
Figura 92	Diseño factorial 2^K . Pinturas horneables.....	257
Figura 93	Interacciones principales imprimante y antioxidante.....	259
Figura 94	Interacción imprimante – antioxidante.....	260
Figura 95	Pareto de significancias de imprimante y antioxidante.....	261
Figura 96	Gráfico normal de significancias de imprimante y antioxidante.....	262
Figura 97	Región experimental bidimensional de la adherencia.....	263
Figura 98	Verificación de supuesto de normalidad de residuos.....	264
Figura 99	Verificación de supuesto de varianza constante predichos-residuos.....	265
Figura 100	Verificación de supuesto de independencia de residuos.....	266
Figura 101	Interacciones principales temperatura-tiempo-tipo de pintura.....	268

Figura 102	Interacciones de tres factores.....	268
Figura 103	Región experimental tridimensional de la adherencia.....	270
Figura 104	Cubo de porcentajes de adherencia para pintura líquida horneable.....	272
Figura 105	Cubo de porcentajes de adherencia para pintura electrostática.....	273
Figura 106	Verificación de supuesto de normalidad de residuos.....	274
Figura 107	Normalidad de las salidas del proceso.....	274
Figura 108	Normalidad de salidas. Pintura electrostática.....	275
Figura 109	Normalidad de salidas. Pintura líquida horneable.....	275
Figura 110	Verificación de supuesto de varianza constante. Predichos-residuos.....	276
Figura 111	Verificación de supuesto de varianza constante. Temperatura-residuos....	276
Figura 112	Verificación de supuesto de varianza constante. Tiempo-residuos.....	277
Figura 113	Verificación de supuesto de varianza constante. Tipo-residuos.....	277
Figura 114	Verificación de supuesto de independencia de residuos.....	278
Figura 115	Histograma de proceso mejorado. Lacas martilladas.....	280
Figura 116	Normalidad de proceso mejorado. Lacas martilladas.....	281
Figura 117	Cartas $\bar{X} - R$ de proceso mejorado. Lacas martilladas.....	281
Figura 118	Capacidad de proceso mejorado. Lacas martilladas. Sin Box-Cox.....	282
Figura 119	Capacidad de proceso mejorado. Lacas martilladas. Con Box-Cox.....	282
Figura 120	Histograma de proceso mejorado. Pintura electrostática.....	284
Figura 121	Normalidad de proceso mejorado. Pintura electrostática.....	285
Figura 122	Cartas $\bar{X} - R$ de proceso mejorado. Pintura electrostática.....	285
Figura 123	Capacidad de proceso mejorado. Pintura electrostática.....	286

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Resumen de la composición empresarial privada en el Ecuador.....	16
Tabla 2	Calificación de las empresas según la Superintendencia de Compañías.....	17
Tabla 3	Márgenes de preferencia para las PYMES.....	18
Tabla 4.1	Metodologías relacionadas con la mejora de procesos (A-B).....	34
Tabla 4.2	Metodologías relacionadas con la mejora de procesos (C-E).....	35
Tabla 4.3	Metodologías relacionadas con la mejora de procesos (I-S).....	36
Tabla 5	Evolución del concepto de calidad.....	41
Tabla 6	Herramientas administrativas aplicadas al DMAIC.....	66
Tabla 7	Objetivos del BSC alcanzables por mejora de procesos.....	68
Tabla 8	Cambio de la cultura organizacional en la gestión por procesos.....	77
Tabla 9	Cambio de la cultura organizacional en Seis Sigma.....	78
Tabla 10	Promedio de empleados por tipo de empresa.....	82
Tabla 11	Empresas ecuatorianas que han adoptado la metodología Seis Sigma.....	88
Tabla 12	Sectores de empresas encuestadas.....	91
Tabla 13	Temas de gerencia en los planes de capacitación.....	92
Tabla 14	Tablas de conversión Sigma.....	109
Tabla 15	Cálculo empírico del tamaño de una muestra.....	125
Tabla 16	Tamaños de muestra , conocidos N, E y a.....	128
Tabla 17	Tamaños muestrales para poblaciones pequeñas.....	128
Tabla 18	Criterios de rechazo con el Valor-P.....	181
Tabla 19	Pruebas de hipótesis Z para una muestra con σ conocida.....	181
Tabla 20	Pruebas de hipótesis t para una muestra con σ desconocida.....	182
Tabla 21	Pruebas de hipótesis Z para proporciones.....	183
Tabla 22	Pruebas de hipótesis Z para dos muestras con σ conocida.....	184
Tabla 23	Prueba F para varianzas de dos muestras.....	185

Tabla 24	Ejemplo de aplicación LSD.....	194
Tabla 25	Datos para diagrama de cajas.....	195
Tabla 26	Niveles C_p y clase del proceso centrado.....	217
Tabla 27	Datos de adherencia. Lacas líquidas de secamiento al ambiente.....	243
Tabla 28	Datos de adherencia. Lacas líquidas martilladas de secamiento al ambiente.....	243
Tabla 29	Datos de adherencia. Pintura líquida horneable.....	243
Tabla 30	Datos de adherencia. Pintura electrostática.....	244
Tabla 31	Medias de las medias de adherencia de las diferentes pinturas.....	246
Tabla 32	Especificaciones para los procesos de pintura.....	252
Tabla 33	Índices de capacidad de los procesos de pintura.....	253
Tabla 34	Combinaciones estándar para dos factores.....	258
Tabla 35	Datos de adherencia. Lacas martilladas. Proceso sin mejora.....	259
Tabla 36	Datos de adherencia. Pinturas horneables. Proceso sin mejora.....	267
Tabla 37	Datos de adherencia. Lacas martilladas. Proceso mejorado.....	280
Tabla 38	Datos de adherencia. Pintura electrostática. Proceso mejorado.....	284

RESUMEN EJECUTIVO

En su primera parte, la estructura de la presente tesis se diseñó para encontrar evidencia suficiente que justifique, o no, un esfuerzo de la Academia por apoyar a la implementación de la metodología Seis Sigma en las PYMES ecuatorianas. De ser positiva la evidencia, como en efecto lo fue, la segunda parte estaría orientada a proporcionar las bases conceptuales indispensables de la metodología, a orientar a quien esté interesado en el uso de ayudas informáticas y a desarrollar una estrategia que contribuya, en ese sentido, a apoyar a este importantísimo sector de la economía.

Esta notable metodología es un camino que ha demostrado una alta eficiencia en la aplicación del método científico a la mejora de procesos. Requiere de cierto nivel de conocimiento de las herramientas administrativas y estadísticas, no es precisamente sencillo ni barato, pero puede contribuir definitivamente al desarrollo de la competitividad de las empresas nacionales, tan pobremente presentes en el ámbito nacional e internacional. El elevado costo-beneficio que reporta a quien se dedica a desarrollarla de manera seria es testimoniado por miles de empresas a nivel mundial.

Los dos primeros capítulos tratan de la posición de la empresa ecuatoriana en el contexto mundial y del importante impulso que las PYMES pueden dar a una economía. Se presentan datos que sorprenden al reflejar la relevancia que en todo el mundo se está dando hoy mismo a las pequeñas y medianas empresas, por lo que toda actividad orientada a elevar el nivel de este sector está plenamente justificada.

En esos capítulos también se describen los actuales conceptos referidos a la calidad, y se dedica tiempo a establecer el ámbito, los requisitos y las características de la metodología Seis Sigma, y en base a ello, se analiza la factibilidad de que el actual recurso humano, técnico y económico de las PYMES ecuatorianas sea suficiente como para implementar y sostener esta metodología, tal vez no necesariamente en toda la amplitud de cultura organizacional que sugiere la

literatura, pero sí como para poder manejar proyectos puntales que eleven la calidad y disminuyan el costo, aumentando la competitividad y abriendo caminos a la exportación. Por algo se debe empezar, y lo más pronto posible.

En el tercer capítulo se describe el aspecto técnico de Seis Sigma y se revisan ciertos elementos estadísticos cuyo conocimiento es determinante para poder manejar correctamente las principales herramientas de la metodología, entre otros y como principales, las Cartas de Control Estadístico y el Diseño de Experimentos. No se trata de convertir a esta tesis en un texto de Estadística, pero sí de hacer hincapié en determinados aspectos de esa ciencia que se han manifestado consistentemente como una debilidad en quienes están capacitándose en Seis Sigma.

En el cuarto capítulo se describen dos proyectos Seis Sigma ejecutados en una pequeña empresa de la ciudad de Quito, con los que se pretende demostrar la factibilidad de aprovechar las ventajas de la metodología, sin proceder a convertirla necesariamente, al menos por el momento, en un ejercicio diario de cultura organizacional.

En el quinto capítulo se comentan las características generales del aula virtual que se ha desarrollado como parte de esta tesis, y que cuyo fin es servir de herramienta de apoyo a quienes vayan a capacitar a técnicos de las PYMES en el uso de Seis Sigma. Finalmente, aquí mismo, se procede a extraer conclusiones y a proponer recomendaciones.

INTRODUCCIÓN

Para definir la utilidad de este trabajo de titulación, orientado a determinar la factibilidad, y después apoyar, el uso de la Metodología Seis Sigma en las PYMES ecuatorianas como una herramienta confiable, útil para mejorar sus procesos, es necesario primero precisar la importancia y realidad de las PYMES en la economía nacional, y ese objetivo constituye una parte importante de la tesis.

Los libros, manuales de procedimientos, guías y demás fuentes referidas a la Metodología Seis Sigma sustentan el éxito de su implantación en el supuesto de que la empresa interesada debe mantener toda una estructura y un equipo dedicados permanentemente y a tiempo completo al desarrollo de proyectos Seis Sigma. Además de que dicho equipo debe estar capacitado para manejar herramientas estadísticas que tienen cierto grado de dificultad. En condiciones ideales, para cada proyecto Seis Sigma, debería contarse con un alto ejecutivo apoyando (champion), un director Seis Sigma, un Master Black Belt, un Black Belt y algunos Green Belt. Sobre todo los Black Belt deben dedicarse exclusivamente al desarrollo y culturización de la metodología en la empresa. Este supuesto de exclusividad, por cuestiones de costo y tamaño, podría cuestionar la idea de que pequeñas y medianas empresas ecuatorianas puedan acceder al Seis Sigma. Se trata entonces de demostrar la factibilidad de la aplicación de esta metodología en las PYMES. Una vez demostrada la conveniencia, si es el caso, se debe dilucidar cómo enfrentar su implantación.

Una cosa cierta, si se decide llevar la metodología Seis Sigma a las PYMES, es que harán falta capacitadores que formen a los técnicos de esas organizaciones. Tal vez la función de capacitación puedan realizarla los estudiantes de los últimos niveles de la Facultad de Ciencias Administrativas y Contables, como tema de sus proyectos de vinculación con la colectividad.

Actualmente, el uso de software es un imperativo en prácticamente toda actividad humana. Más aún en cuestiones técnicas. Y, definitivamente, el Seis Sigma es un asunto técnico. Es de las pocas metodologías que realmente pueden exhibir un enfoque científico, basado en el análisis de datos y en el manejo de una herramienta matemática: la Estadística. Quizá por ello ha alcanzado tantos éxitos en el mundo, mejorando los procesos de las organizaciones por medio de reducir su variabilidad. Por tal motivo, en este trabajo se pondrá énfasis en el manejo de paquetes y aplicaciones informáticos.

Como se mencionó, este trabajo debe justificar si el esfuerzo invertido en estudiar y trabajar con la Metodología Seis Sigma para las PYMES es válido en cuanto ella puede mejorar su forma de administración y su competitividad; pero además debe justificar por qué usar Seis Sigma y no cualquier otra metodología.

Otro aspecto que se debe considerar es el relativo a la orientación hacia las PYMES ¿Por qué se decidió trabajar con ellas y no con grandes empresas? Estas últimas definitivamente están en mejores condiciones de emprender en un propósito que es relativamente exigente y caro, como es trabajar con Seis Sigma. Tienen ingenieros, técnicos y ejecutivos capaces de manejar un conjunto de herramientas que requieren de una buena formación académica. Entonces, ¿Existen argumentos suficientemente importantes como para explicar la preocupación por la PYMES?

Finalmente, debe señalarse que Seis Sigma maneja herramientas que la hacen igualmente aplicable tanto a empresas manufactureras como a empresas de servicios. Sin embargo, donde con mayor amplitud pueden aplicarse sus herramientas es en la manufactura. Quizá porque en ese sector nació Seis Sigma (Motorola); y también por la relativa facilidad que dan las empresas productoras de bienes para obtener datos cuantitativos en abundancia (así como para ejecutar experimentos), en un ambiente técnicamente

controlado. Además, el proceso normal de desarrollo económico de un país exige que el sector de la manufactura culmine con ciertas etapas para poder seguir adelante. Estas etapas en verdad no han sido cumplidas adecuadamente por nuestra economía. Por eso es necesario enfatizar en la aplicación de Seis Sigma a la manufactura. Otro argumento que se mencionará en ese sentido es que muchos países ven en las PYMES del área de manufactura un mecanismo confiable de refuerzo a las exportaciones.

1. FORMULACIÓN, OBJETIVOS, JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

1.1. FORMULACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es factible el manejo efectivo de la Metodología Seis Sigma en el ámbito de la pequeña y mediana empresa ecuatoriana, de manera que ésta encuentre un apoyo positivo en su gestión por Procesos? ¿Se pueden implementar los mecanismos adecuados para apoyar a las PYMES en el proceso de formación de profesionales y técnicos que utilicen Seis Sigma de manera consistente?

Al momento, la llamada Gestión por Procesos tiene una presencia bien consolidada en el medio local empresarial, público y privado. Es bien conocido que en varios ámbitos se trabaja bajo esta estrategia administrativa. En cambio, no se conoce a ciencia cierta el nivel de penetración de la Metodología Seis Sigma en las empresas ecuatorianas, sobre todo en las PYMES. Uno de los objetivos de este trabajo de titulación es precisamente dilucidar, aunque sea aproximadamente, el grado de presencia de la metodología en nuestro medio.

Se espera facilitar la definición y resolución del problema planteado sistematizándolo en tres fases:

- a) En la primera fase se trata de evidenciar la necesidad que tienen las PYMES de usar modernas herramientas y técnicas de administración que eleven su competitividad, como es el caso de la metodología Seis Sigma. A continuación, se establece el marco teórico de la metodología y se describen sus conceptos relevantes, condicionamientos y protocolo, a fin de analizar si ella puede acoplarse, y de qué manera, a la realidad de las PYMES ecuatorianas.
- b) Después, se procede a describir el universo de herramientas al

que recurre Seis Sigma a lo largo del protocolo, y a proporcionar algunas guías sobre sus momentos y formas de aplicación. Todas las herramientas usadas por Seis Sigma ya existían, incluso antes de que esta metodología aparezca, y es de suponer que los estudiantes de administración o ingeniería ya las han revisado en sus cursos de pregrado o posgrado. No hace falta redefinirlas, aunque sí se pondrá énfasis en algunos conceptos básicos, a veces no lo suficientemente profundizados, que han hecho de la metodología Seis Sigma lo que ahora es, a saber el recurso para la mejora de procesos con mayor éxito en el mundo empresarial. Algunos de esos conceptos son: normalidad, variabilidad, métrica, nivel de desempeño sigma, distribuciones de probabilidad, teorema del límite central, tamaño de la muestra, gráficas de control, capacidad, pruebas de hipótesis y diseño de experimentos. Siempre que es posible, se hace uso de aplicaciones informáticas que, ciertamente, ayudan en el trabajo repetitivo y dejan más bien espacio al análisis de los resultados obtenidos.

- c) En la tercera fase se ejecutan dos proyectos Seis Sigma en una pequeña empresa manufacturera de la ciudad de Quito, y por ese medio se procura evidenciar la factibilidad de uso de la metodología en las PYMES y las ventajas económicas que se pueden obtener de manera prácticamente inmediata.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la importancia de las PYMES en la economía y la importancia de la metodología Seis Sigma en el contexto de los Sistemas de Gestión de la Calidad. Evaluar si la Metodología Seis Sigma puede funcionar en las PYMES. Contrastar los conceptos, herramientas y protocolo de la Metodología Seis Sigma de forma tal que las empresas ecuatorianas con tamaño y recursos limitados puedan acceder a una disciplina moderna,

técnica y probada. Desarrollar una estrategia que facilite un uso exitoso de la metodología por las PYMES.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El resultado final del presente trabajo de titulación estará conformado por la culminación de los siguientes objetivos específicos:

- El desarrollo escrito del trabajo de titulación, profundizando en la metodología Seis Sigma, enfatizando los conceptos claves que pueden ser de utilidad para su implantación en las PYMES. Se mencionan empresas ecuatorianas que han implantado la metodología exitosamente.
- La aplicación de lo estudiado en proyectos Seis Sigma para una pequeña empresa manufacturera de Quito.
- Diseño y construcción de un Aula Virtual que se pueda utilizar para presentar de manera pedagógica las bases conceptuales, herramientas y procedimientos desarrollados en el trabajo de titulación. Esta aula podrá ser utilizada para capacitar a los técnicos de pequeñas y medianas empresas que quieran usar Seis Sigma.

1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

1.3.1. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE ÍNDOLE EXTERNA

Para que un país sea competitivo a nivel internacional, definido este concepto como la capacidad de incrementar la participación de sus productos de exportación en el mercado mundial, necesita de empresas que tengan altos índices de productividad, elevada calidad y variedad de bienes y servicios. La empresa es clave en la competitividad relativa de los países. Pero más allá de eso, según Paúl Krugman, Premio Nobel de Economía 2008, no es la

competitividad entre los países lo que incrementa el nivel de vida de sus ciudadanos, si no la elevación de la productividad de sus empresas¹.

La Productividad se define como la cantidad de bien o servicio (intermedio o final) que se puede generar a partir de una cantidad dada de recursos que ingresan a un proceso de transformación determinado. El tiempo también es un insumo del proceso, por lo que no tiene sentido hablar de cantidad producida por unidad de tiempo. En realidad, siempre debe hablarse de dólares generados por cada dólar invertido.

A nivel macroeconómico nacional y microeconómico (de empresa o sectorial) se utilizan índices como la “Productividad Total de los Factores” (PTF) o la “Productividad Media del Trabajo” (PMT), que se calculan por medio de las fórmulas inventadas por Arnold Harberger, director del prestigioso Departamento de Economía de la Universidad de Chicago. Con fines de comparación, es muy utilizada la PMT que, en síntesis, refleja la cantidad de valor agregado con que cada trabajador promedio contratado aporta a la economía².

Los países de América Latina y el Caribe presentan serios problemas de productividad y de competitividad. En la Figura 1 se puede ver un comparativo de la Productividad Media del Trabajo, por sectores de empresas de América latina y el Caribe, respecto de los mismos índices que ocurrieron en Estados Unidos entre 1.980 y 2.001. En los años presentados, la Productividad Media del Trabajo de nuestra región apenas sobrepasaba la tercera parte de los índices correspondientes de los Estados Unidos.

En la Figura 2 se presenta una comparación similar, más actualizada, y en la que aparece el Ecuador. Conforme con la Figura 2, el Ecuador ha disminuido casi a la mitad su índice de Productividad Media del Trabajo entre 1.980 y 2.005. Y, de hecho, en el año de 2.005 nuestra productividad era la quinta parte del índice correspondiente de los Estados Unidos.

¹ <http://www.esan.edu.pe/conexion/actualidad/2014/01/29/krugman-porter-competitividad-peru/>

² BCE. “Boletín de Indicadores Sectoriales de Competitividad y Productividad” Dirección General de Estudios.

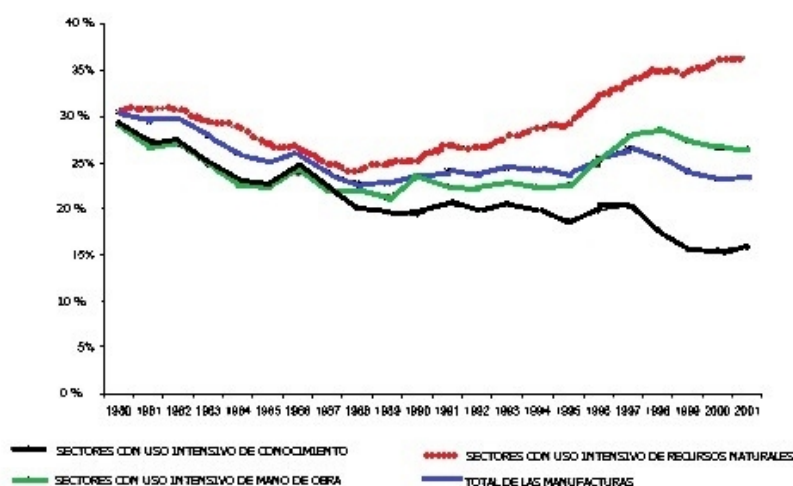


Figura 1: Productividad relativa del trabajo de América Latina con respecto a la de Estados Unidos.

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile, 2005. ANALISIS DE LA DINAMICA INDUSTRIAL.

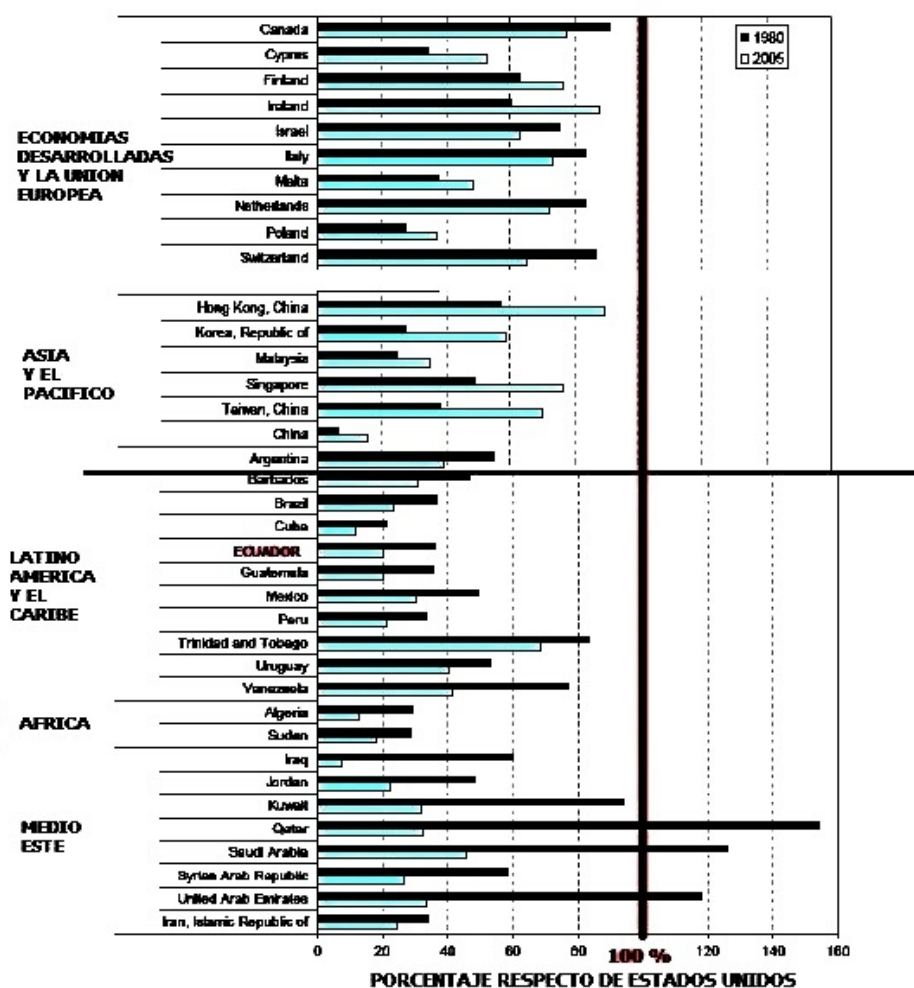


Figura 2: Productividad Media del Trabajo, como porcentaje del índice de Estados Unidos. Comparativo 1.980 - 2005

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *Estudio Económico de América Latina y el Caribe 2006-2007* (LC/G.2338.P/E), Santiago de Chile, julio 2007. Publicación de las Naciones Unidas.

Para saber lo que pasó después, y puesto que el Banco Central del Ecuador no ha publicado índices comparativos para el período comprendido entre 2.005 y el presente, se presenta la Figura 3, desarrollado en el Diario El Telégrafo en su edición del 15 de Julio de 2.013.

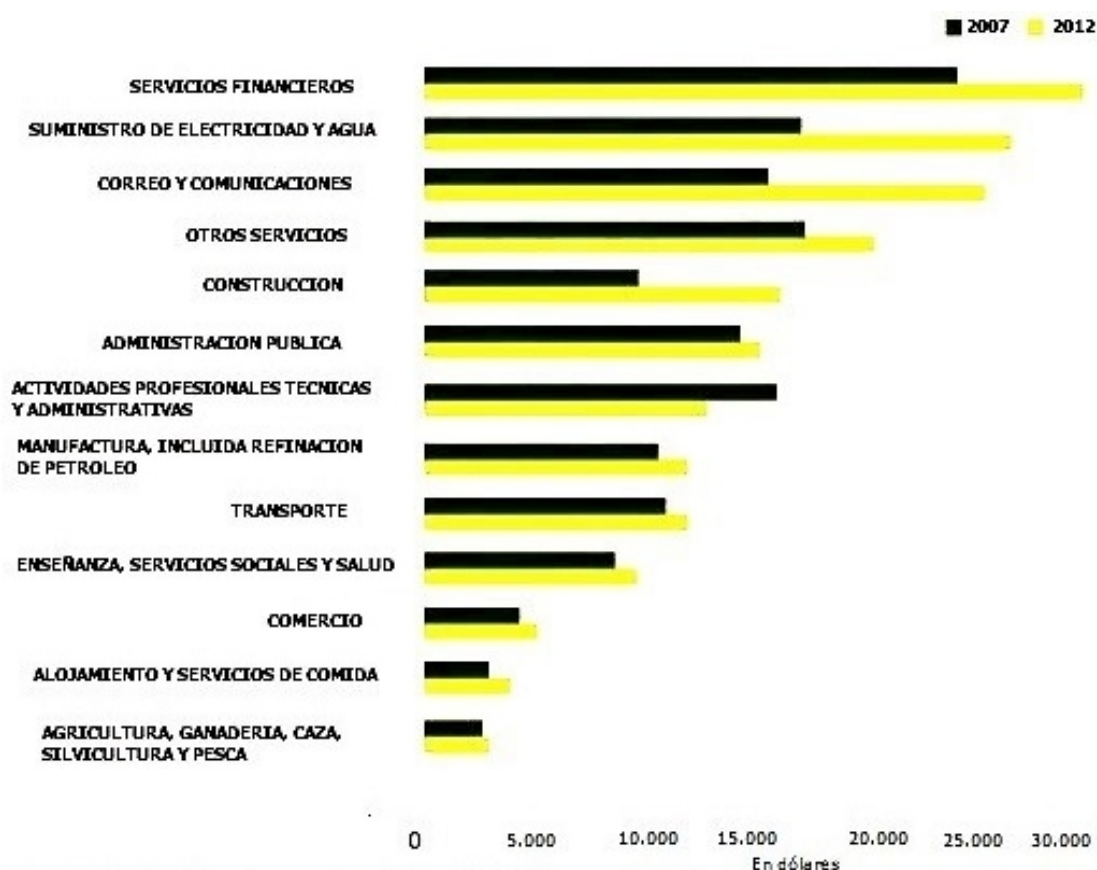


Figura 3: Productividad del trabajo en Ecuador, por ramas económicas no petroleras - 2007 y 2012

Fuente:BCE. Cuentas nacionales e INEC. Encuestas de empleo, desempleo y subempleo

Más que el detalle mismo de los datos, interesa conocer que –según los cálculos del especialista que realizó el editorial- el índice promedio de Productividad del Trabajo del país creció entre 2.007 y 2.012 en apenas un 3,5%. Un crecimiento insignificante que valida los datos de la Figura 2, en lo que al Ecuador se refiere. Por tanto, puede afirmarse sin temor a incurrir en una equivocación significativa, que nuestro país presenta índices comparativos de

productividad alarmantemente bajos, a tal punto que difícilmente podría hablarse de ser competitivos en el mercado internacional.

El Banco Central del Ecuador ha publicado algunos índices de Productividad Media del Trabajo por sectores, pero al ser datos absolutos, sin referencia comparativa, el lector no puede saber si es que esos índices son buenos, regulares o malos. Para saber si somos competitivos, por sectores en el concierto internacional, sería preciso comparar nuestros índices con los de otros países, y ese tipo de información no es procesada por el referido banco. Debemos inferir, por tanto, que todos los sectores productivos del país se encuentran en desventaja respecto de sus similares del exterior en lo que a productividad se refiere.

Que se necesita elevar la productividad de las empresas ecuatorianas está fuera de toda duda. El problema radica en la manera de hacerlo, pues la respuesta no es simple. Los economistas y sociólogos han demostrado que la productividad depende de factores tan diversos y complejos como la salud y la educación primaria, la innovación y las instituciones (Ver Figura 4).

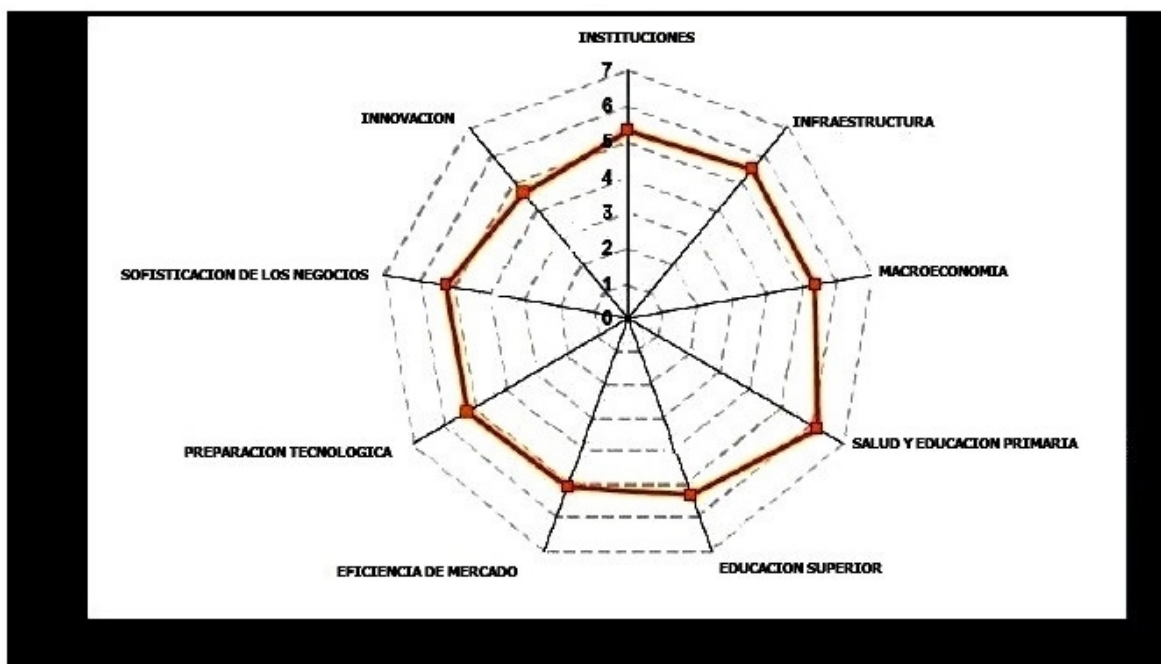


Figura 4: Factores que influyen en la productividad

Fuente: Foro Económico Mundial (The Global Competitiveness Report 2008 - 2009)

Para empezar, mientras no se mejore la salud de la población y la educación primaria de los niños, ni hablar de poder incrementar los índices de productividad de las empresas. Es el factor más importante de todos. Pero, además, están factores tan aparentemente inmanejables en el Ecuador como la transparencia del mercado o las instituciones.

Además de los factores que aparecen en la Figura 4, existe otro conjunto de factores que se consideran de importancia entre los que sirven de apoyo a los esfuerzos por incrementar la productividad de las empresas: los que promueven la facilidad de hacer negocios en una economía. Lo inverso, que es lo que usualmente se compara, serían los factores que aumentan la dificultad de hacer negocios, oponiéndose al crecimiento de la productividad (Ver Figura 5).

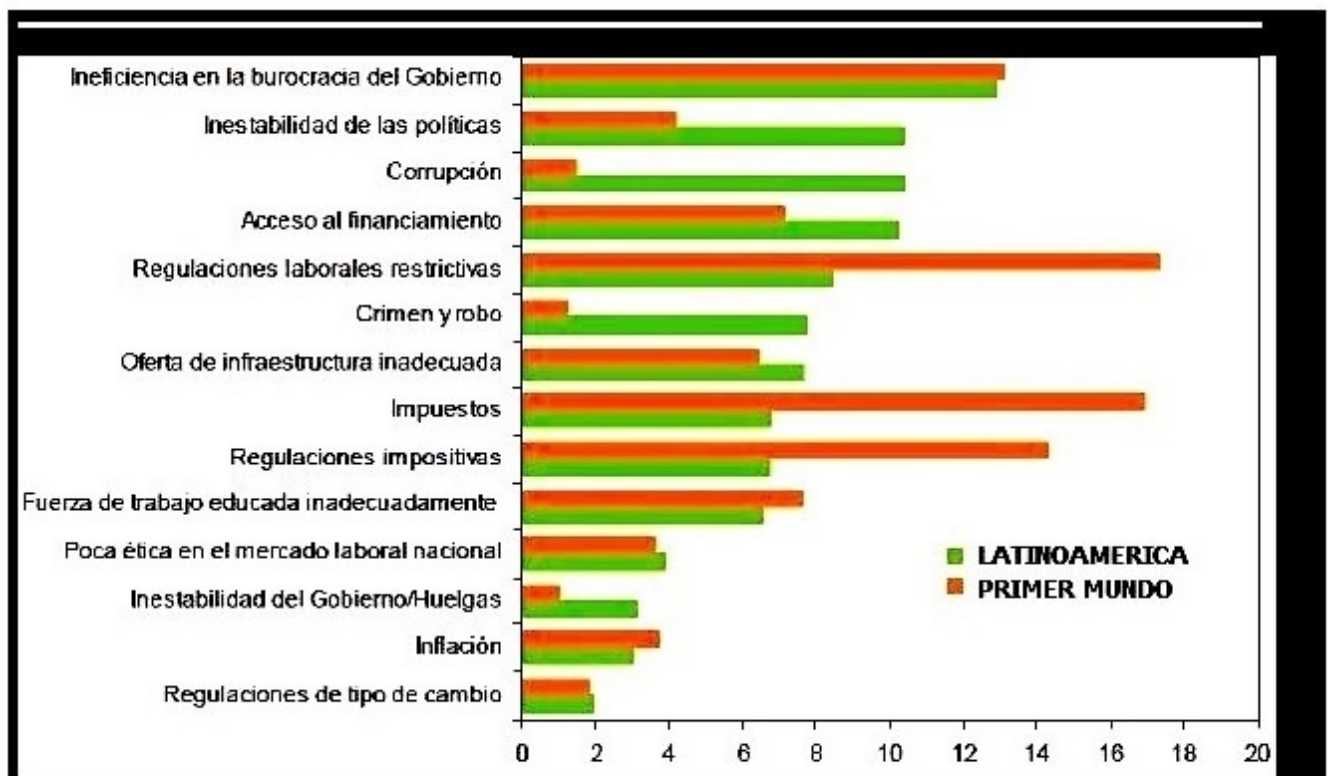


Figura 5: Factores que se oponen a la facilidad de hacer negocios
Fuente: FORO ECONÓMICO MUNDIAL

En definitiva, existen muchos factores incidiendo sobre la productividad de las empresas, y por tanto de los países. Algunos, como la corrupción o la delincuencia, están en manos de la familia, el estado y los educadores; y tienen un trasfondo incluso cultural. Mejorar todo ese contexto entretelado por los factores señalados en las Figuras 4 y 5 puede requerir de un esfuerzo que lleve generaciones, pero tiempo es lo que menos tenemos. Los países afuera están alejándose geométricamente hacia niveles de productividad, calidad y competitividad inalcanzables. Por tanto, cada uno de los actores que conforman el país deberá hacer ya mismo su mejor trabajo en la parte que le toque. Y también cada uno de los actores participantes en la dirección, operación, técnica y soporte de las empresas deberemos hacer el mejor esfuerzo posible, en las áreas que estén dentro de nuestras competencias.

El objetivo de Seis Sigma es mejorar la productividad y la calidad generada por los procesos individuales que ocurren en una organización, en todos los niveles. Y es precisamente ese objetivo de la metodología el que le permite poner su grano de arena en la lucha por el aumento de la productividad total y la competitividad de la empresa, del sector y del país.

La importancia de Las PYMES a nivel mundial es enorme. En todos los países representan, de largo, la mayor parte de las unidades productivas. Y ello va en crecimiento. En 1986, en Estados Unidos y Canadá las pequeñas empresas constituían el 97% de todos los negocios; empleaban un 57% de la fuerza laboral y producían el 45% del producto interno bruto (Ibrahim y Goodwin, 1986). Leebaert (2005) reporta que para 2005 las PYMES representaban un 99,7 % de todos los empleadores en Estados Unidos³.

Según Hernández y Bruch (1983) (citados por Dart y Sarkar, 1990) en los países europeos como Alemania, el 98% de todas las empresas industriales son PYMES con 500 trabajadores o menos, y producen casi el 33% del volumen de negocio industrial; igualmente en Italia, Suecia,

³ <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2011/meec/Importancia%20de%20las%20PyMES.htm>

Japón, Indonesia y en Malasia las PYMES contribuyen en promedio con un 90% al total de empleos⁴.

La Conferencia de Industrias Británicas señala que en los países industrializados, del 60 al 80 % del total de establecimientos corresponden a las PYMES, y es una cifra que se incrementa cada día (Cota, 1998). Otros autores como Wijewardena y Cooray (1995) señalan que, a nivel mundial, el 90% del total de las empresas son PYMES. En México, en el año 2004, existían 4'290.108 unidades económicas que daban empleo a 23'197.214 personas (INEGI 2004). El 95.0% del total de las unidades económicas tenían menos de 10 personas ocupadas; 3.9% ocupaban de 11 a 50 personas; 0.9% tenían entre 51 y 250 personas y 0.2% ocupaban 251 y más. Las PYMES generan ahora seis de cada diez empleos; y contribuyen al desarrollo regional, en todas las actividades productivas. Las PYMES participan en el comercio internacional de México, además de apuntar hacia un mercado local y regional.

En el 2001, las exportaciones totales de México alcanzaron casi los 160 mil millones de dólares y el 95 por ciento de los exportadores mexicanos fueron PYMES⁵. En Colombia, tras la firma del Tratado de Libre Comercio (TLC) con EE. UU. y de un trabajo coordinado de varios organismos como las Cámaras de Comercio, la Oficina para el Aprovechamiento de los TLC, Bancóldex, iNNpulsa, gremios, centros educativos locales, el Programa de Transformación Productiva y PROEXPORT, se ha logrado que el monto de exportaciones de las micro empresas crezca, entre 2010 y 2013, en un 11,4% hasta USD 670 millones (para el mismo período las exportaciones de las grandes empresas colombianas crecieron en un 4.1%). Las exportaciones de las pequeñas empresas crecieron en 5,5%. El número de microempresas que exportan

⁴ <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2011/meec/Importancia%20de%20las%20PyMES.htm>

⁵ <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2011/meec/Importancia%20de%20las%20PyMES.htm>

subió de 739 a 1.130, y ahora sus exportaciones representan el 7.9% de las exportaciones totales del vecino país del norte. El 73% de las empresas que atiende PROEXPORT son PYMES⁶.

En definitiva, la incidencia económica de las PYMES en el planeta es enorme. Generan de largo la mayor cantidad de los empleos a nivel global y aumentan su número sin parar. Quieren exportar, y su participación en el comercio mundial crece proporcionalmente más de lo que lo hacen las grandes empresas. Por tanto, cualquier estrategia emprendida para mejorar su calidad, su competitividad, capacidad de gestión y su capacidad técnica (incluyendo el uso de TIC's) constituye una prioridad para cualquier economía. Los gobiernos de todos los países se empeñan en dar a las PYMES las mejores condiciones posibles para que puedan desarrollarse exitosamente.

1.3.2. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE ÍNDOLE INTERNA

En Ecuador la situación no es diferente, excepto en lo que a exportación se refiere. El 70% de las empresas registradas en la Superintendencia de Compañías son PYMES, pero si se cuentan aquellas no registradas en ese organismo, el porcentaje de PYMES en el país se eleva al 99,5% (Tabla 1). En el año 2011 sus ingresos fueron de USD 23.000 millones y su contribución al impuesto a la renta superó los USD 270 millones⁷.

Conforme con la Tabla 1 (elaborado a partir de la información procedente de diferentes fuentes confiables, pues no existe información proporcionada por algún organismo oficial), se puede conocer que las PYMES de todos los sectores del país generan aproximadamente el 60% del empleo urbano, porcentaje que se eleva al 70% si se trata del sector manufactura; y contribuyen al PIB no petrolero en un 25 – 30 %.

⁶ Acuerdos de Colombia impulsan las ventas de las microempresas. (2014, 10 de agosto). El Comercio, pp. A7.

⁷ <http://ekosnegocios.com/negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=1217>

Además de la enorme capacidad de generar empleo, se reconoce en las PYMES una gran adaptabilidad frente a los cambios y un fuerte poder redistributivo. Además, se estima que pueden proveer de un fuerte escudo de amortiguación económica en el caso de que ocurra una crisis internacional generalizada. Su potencial exportador no es menos importante, al punto de que en todo el mundo se procura promover la asociatividad empresarial de las PYMES, de forma de potenciar su participación en el comercio exterior. Por eso se crean mecanismos y organismos estatales de apoyo a estas empresas.

En Colombia por ejemplo, la industria de prendas de vestir ha tenido un gran desarrollo en las últimas décadas en base a criterios de “asociatividad”, igualmente en Argentina con los complejos metalmecánicos y de muebles⁸. También se visualizan esfuerzos a nivel institucional, como en el caso de Chile bajo la tutela de CORFO (Corporación de Fomento), que promovió los Programas de Fomento Sectorial (PROFOS) y Colombia con su programa PRODES. Italia, con ayuda del Estado en todos los niveles, ha logrado superar en gran parte las dificultades y desarrollar sus pequeñas y medianas empresas⁹.

En el Ecuador, a fines del 2009, se firmó un convenio entre la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO)-Sede Ecuador y el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO) del Gobierno ecuatoriano. Dicho convenio dio paso a la creación del Centro de Investigaciones Económicas de la pequeña y mediana industria (CIEPYMES), el cual busca generar investigaciones para el desarrollo de las MIPYMES del sector manufacturero así como

⁸ Fernández, Víctor y otros (2009). “Clusters y desarrollo regional en América Latina. Reconsideraciones teóricas y metodológicas a partir de la experiencia argentina”. *Revista Eure* XXXV(106): 177-180, Diciembre.

⁹ Pallares, Zoilo (2007). *La asociatividad empresarial: Una respuesta de los pequeños productores a la internacionalización de las economías*. Diario de Negocios HOY, artículo “La asociatividad es la clave para generar el desarrollo empresarial”. Proyectos de ACUDIR publicado el 13 agosto del 2009.

Tabla 1:

Resumen de la composición empresarial privada en Ecuador

TIPO DE EMPRESA	TODOS LOS SECTORES ECONOMICOS				MANUFACTURA		
	NUMERO TOTAL PAIS	PORCENTAJE ³	GENERACION EMPLEO (% PEA URBANA)	CONTRIBUCION AL PIB NO PETROLERO	NUMERO TOTAL PAIS	PORCENTAJE	GENERACION EMPLEO (% PEA)
MICRO	631.282	89,60%	43,0% ⁴	10 % a 15% ¹	13.600	68,0% ⁵	70% ⁷
PEQUEÑA	57.774	8,20%	14,5% ⁴	10 % a 15% ⁶	5.000	25,0% ⁵	
MEDIANA	11.977	1,70%	4,2% ⁴		480	2,4% ⁵	
GRANDE	3.523	0,50%	0,4% ²	N / A	340	1,7% ⁵	N / A
TOTALES	704.556 ³	100,00%			20.000 ⁵	97,1% ⁵	

ELABORADO POR: BOLIVAR CONDOR - Junio 2014

1.-USAID (2005). "Microempresas y microfinanzas en el Ecuador: resultados"

2.- gtz, CEPAL & CENPROMYPE (2009) Manual de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa

3.- INEC(2012) Directorio de Empresas y Establecimientos (DIEE)

4.- INEC (2009). Encuesta trimestral de empleo, subempleo y desempleo de septiembre 2.009. Quito.

5.- Stratega (2008). "Informe de resultados de la Encuesta nacional a micro, pequeñas y medianas empresas de la industria manufacturera"

6.- <http://ekosnegocios.com/negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=1217>7.- <http://ekosnegocios.com/negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=1184>

fortalecer las herramientas analíticas de monitoreo y seguimiento de las MIPYMES en general¹⁰.

Nótese que se ha abierto la categoría de las PYMES para poder diferenciar a las microempresas, que en realidad constituyen la inmensa mayoría de las empresas en el Ecuador, hablándose ahora de las MIPYMES. En este trabajo de titulación se hablará en general de PYMES, pero se deja constancia en la Tabla 2 de la clasificación oficial de las empresas, conforme a la Resolución 1260 de la Comunidad Andina de Naciones, CAN, resaltándose el hecho referido a que en caso de conflicto entre los dos primeros criterios de clasificación, prevalecerá el económico – valor bruto de las ventas anuales- sobre el criterio de personal ocupado:

Tabla 2:
Clasificación de las Empresas

Variables	Micro Empresa	Pequeña Empresa	Mediana Empresa	Grandes Empresas
Personal Ocupado	1 - 9	10 - 49	50 - 199	> 200
Valor Bruto de las ventas anuales	< 100.000	100.001 - 1.000.000	1.000.001 - 5.000.000	> 5.000.000
Montos Activos	Hasta US \$ 100.000	De US \$ 100.001 hasta US \$ 750.000	De US \$ 750.001 hasta US \$ 3,999.999	> US \$ 4.000.000

Fuente: Resolución No. SC-INPA-UA-G-10-005 - SUPERINTENDENCIA DE COMPAÑÍAS

(Nota: la clasificación por Monto de Activos es un añadido de la Superintendencia de Compañías del Ecuador, sin explicar su orden de prelación respecto de los otros dos criterios).

El gobierno del Ec. Rafael Correa creó el Instituto Nacional de Compras Públicas (INCOP, hoy SERCOP) y entre la normativa relacionada con las Subastas Inversas, que sustentan la mayor parte de los procesos de contratación por parte del Estado, debe resaltarse la política de preferencias orientada a favorecer a las PYMES:

¹⁰ Aguilar, A., Arghoty, A., Burgos, S., Gualavisí, M., Onofa, M., Ruiz, P., Sáenz, M., González, R., Muñoz, L., Sión, V., Zambrano, R., y Díaz, C. (2013). *Estudios industriales de la micro, pequeña y mediana empresa*. Quito; Gráficas V & M.

Tabla 3:
Márgenes de preferencia para las PYMES

TIPO DE PROVEEDOR	MARGEN DE PREFERENCIA
Mediano	(Grande) 5%
MYPE	(Mediano) 5%
	(Grande) 10%

Fuente: Reglamento General de la LOSNCP

El Ministerio Coordinador de la Producción, Empleo y Competitividad ha creado algunos programas que promueven el desarrollo de las empresas ecuatorianas, incluyendo a las PYMES. “CreEcuador”, “EmprendEcuador”, “InnovaEcuador” y “Hace bien, Hace mejor” son programas que intentan proveer asesoría, información, capacitación, financiamiento y estímulo al emprendimiento y a la innovación. También mejorar las prácticas empresariales¹¹.

El Ministerio de Turismo, con su programa “Turismo para todos”, apoya a emprendedores y microempresarios en zonas de gran atracción turística y altos índices de pobreza¹².

También el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO), más allá del apoyo a través de Compras Públicas, tiene programas de acceso a las tecnologías de información y telecomunicaciones por parte de las PYMES, de apoyo al sector artesanal, y de convenios de cooperación (por ejemplo, con el Gobierno de Japón) para la obtención de fondos destinados a las actividades productivas de las PYMES que generen empleo y respeten el medio ambiente. CODEPYME ECUADOR, en coordinación con el fondo FONDEPYME, tiene por objetivo incrementar la productividad y competitividad de las PYMES.

¹¹Ministerio Coordinador de la Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC) (2010). Disponible en: www.produccion.gob.ec/programas-y-servicios.

¹² Ministerio de Turismo (2010). “Turismo para todos”. Disponible en: <http://www.turismo.gob.ec>.

Todo esfuerzo invertido en apoyar a las PYMES en el país está justificado, y es lo que hacen los gobiernos del mundo entero. Pero, además de eso, el apoyo científico que pueda brindar la Academia para ayudar a dinamizar un sector tan rico en posibilidades y prometedor en su contribución al bienestar colectivo no sólo es bienvenido, si no obligatorio:

“El rol de los centros de investigación y de formación profesional es central en el desarrollo de una industria nacional innovadora y, por lo tanto, afecta ya sea directa o indirectamente a la micro, pequeña y mediana empresa. Con el sector de la academia existen dos tipos de vinculaciones importantes para el microempresario, pero que deben partir desde los claustros, presentándose así como oferta y no debiendo responder únicamente a la demanda.

“El primer vínculo que debe robustecerse y que es fundamental para el desarrollo y fortalecimiento del sector es la academia como generadora de capacidades. Esto no implica únicamente programas de formación de técnicos –lo cual es importante–, pero sí de capacitación en el uso de tecnologías de la información y las comunicaciones, en la utilización de herramientas de gestión y administración de las empresas, en las formas modernas y más eficientes de organizar los talleres; y finalmente, pero no por ello menos importante, en los nuevos medios y métodos para relacionarse con el cliente y aprender de él.

“El segundo vínculo, tiene relación con la función de la academia como generadora de innovaciones y facilitadora de nutrientes de la empresa. La mayoría de las MIPYMES no cuentan con los recursos necesarios para hacer investigación y desarrollo, y menos para pagar las licencias de las grandes empresas. Es por ello que a la academia le corresponde la función pilar de desarrollar nuevos productos y procesos, a fin de ponerlos a disposición de los microempresarios a menores costos que los de mercado. Aquello siempre bajo la lógica de que el microempresario no debe ser favorecido en deterioro de otros, sino para otros, que el conocimiento transversal solo se puede lograr cuando académicos y empresarios comprenden que el trabajo mancomunado debe enfocarse a la ayuda y el desarrollo comunitario, especialmente en sectores de tanta importancia para el desarrollo social y que no cuentan con los recursos necesarios para realizar las investigaciones que las universidades tienen.”¹³

1.3.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

En esta sección se revisará la repercusión que puede tener la implantación de la metodología Seis Sigma sobre tres aspectos claves para el ámbito en que trabajan las PYMES:

¹³ gtz, CEPAL & CENPROMYPE (2009) Manual de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa

(1) elevar el nivel de manejo administrativo, al dominar mejores técnicas de gestión, incluyendo las TICs; (2) incrementar la competitividad de las PYMES (las dedicadas a la manufactura, especialmente) por medio de potenciar su productividad; y (3) como consecuencia de lo anterior, facilitar la exportación de bienes originados por este sector, una actividad económica de la cual está muy necesitado el país en el propósito de estabilizar su balanza de pagos.

Muchas fortalezas acompañan a las PYMES, pero también fuertes falencias. Entre las más señaladas están: falta de eficiencia, desconocimiento del mercado, carencia de liderazgo, baja calidad de información de su entorno, falta de asistencia técnica, de capacitación, de acceso a crédito y de modernización. Insuficiente e inadecuada tecnología y maquinaria para la fabricación de productos, insuficiente capacitación del talento humano, insuficiente capacidad productiva, falta de adecuación de la maquinaria y los procesos propios a las normativas de calidad exigidas por otros países o por las grandes empresas, escasa capacidad de negociación, inexistencia de estrategias globales de internacionalización, débiles encadenamientos productivos, débil acceso a insumos, costos elevados de desperdicio, etc. Y, sin embargo, los principales agentes económicos apuestan por ellas.

Desde el punto de vista de este trabajo, las ventajas que conlleva el aprender a gestionar los negocios por procesos y a mejorar los mismos continuamente mediante la aplicación de una metodología como Seis Sigma son varios: capacitación, orientación hacia nuevos conceptos de administración, enfoque al cliente, eliminación de desperdicios, aumento de la productividad, incremento del nivel de calidad y acceso a nuevas tecnologías.

Por otro lado, es necesario focalizar la importancia que tiene el fortalecimiento del sector manufacturero para la economía de un país. Se exportan bienes, antes que servicios, pero también ocurre que en el proceso de avance de los países hacia una posición de desarrollo, el capítulo de llevar al sector industrial nacional hasta un nivel mínimo de variedad,

productividad y calidad exportables es un paso que no puede evitarse. Por eso, el desarrollo de este sector es un buen indicador de la sofisticación económica de un país. Adicionalmente, estas empresas están entre las que generan mayor valor agregado medio laboral. Por último, originan fuertes encadenamientos productivos hacia adelante y hacia atrás. Y no se debe olvidar que el 98% de las empresas manufactureras privadas del país son PYMES.

En los países en vías de desarrollo las empresas PYMES manufactureras enfrentan problemas adicionales a los ya mencionados: mercados internos pequeños que favorecen el consumo de bienes básicos; bajo acceso a insumos manufacturados, que deben ser importados y sujetos a variaciones de precios externos; capacidades técnicas bajas de los empleados; altos costos de transporte e infraestructura deficiente; inestabilidad institucional y macroeconómica; poca capacidad de planeación a mediano y largo plazo¹⁴.

Para enfrentar algunos de esos problemas, la asociatividad de las PYMES ha sido una excelente opción en muchos países, aunque en el Ecuador no se ha conocido de este tipo de experiencias. Afuera, se han organizado diferentes modalidades de asociación: distritos industriales locales, clústers regionales, cadenas y minicadenas productivas, consorcios, redes, etc.

“Los gobiernos de países como Inglaterra, Alemania, Francia, Italia, Suecia y España, entre otros, prestan apoyo abierto a los grupos organizados de este tamaño de empresas (PYMES) que compiten a nivel internacional. En Estados Unidos, a pesar de no existir apoyo explícito para este tipo de organizaciones empresariales, se estimula indirectamente con las compras estatales, tal es el caso de las empresas ubicadas en el Silicon Valley. En los países de desarrollo intermedio como Brasil, Argentina, México, India y en los de más bajos ingresos como la mayoría de países africanos, también se conocen importantes experiencias locales sobre formas de organización asociativa de micros, pequeñas y medianas empresas que están enfrentando exitosamente la competencia internacional unificadamente”¹⁵.

¹⁴ Tybout, J. (2000). “Manufacturing firms in developing countries: How well do they do and why?”. *Journal of Economic Literature* 38(1): 11-44.

¹⁵ Aguilar, A., Arghoty, A., Burgos, S., Gualavisí, M., Onofa, M., Ruiz, P., Sáenz, M., González, R., Muñoz, L., Sión, V., Zambrano, R., y Díaz, C. (2013). *Estudios industriales de la micro, pequeña y mediana empresa*. Quito; Gráficas V & M.

En el 2012, el índice general de Productividad Media Laboral del país estaba entre USD 15.000 y USD 25.000. A pesar de su ineficiencia, varias ramas de actividad del sector manufacturero presentaban índices visiblemente superiores a ese promedio: fundición (100.255); caucho y plástico (48.9234); productos minerales no metálicos (44.840); madera y productos de madera (41.124); químicos (40.252); bebidas (39.103); papel y productos de papel (37.729); productos alimenticios (36.546); productos metálicos, excepto maquinaria (35.039); automotores y remolques (34.285); productos de tabaco (27.460). En otras palabras, es un buen negocio manufacturar, agregar valor, y sería mejor si se lo hiciera eficientemente. La media del índice analizado para el sector, en 2008, fue de USD 34.664.

Todos los datos mencionados previamente fueron encontrados en las Encuestas de Manufactura y Minería del INEC. Allí se encontró también que, en 2012, el sector manufacturero produjo 17.073 millones de dólares (el PIB no petrolero para ese año fue de USD 41.000 millones). Las diferentes ramas aportaron en montos que no tienen que ver con su índice de Productividad Media Laboral. Por ejemplo, la industria de elaboración de productos alimenticios contribuyó con 7.266 millones de dólares (aunque es básicamente una actividad de características agroindustriales, con bajo componente tecnológico y bajo valor agregado), y la industria de fabricación de sustancias y productos químicos aportó con 1.319 millones de dólares.

Debe tenerse presente algo más: ***“...el crecimiento y desarrollo del sector manufacturero es un paso de desarrollo intermedio que permite a las sociedades que se basan en producción primaria pasar a un estado de mayor crecimiento, menor vulnerabilidad a los choques externos y un mayor valor agregado. El Ecuador... ha pasado de una economía primaria, a una segunda etapa en la cual el sector terciario o de servicios ha crecido en importancia, mientras que el sector manufacturero ha quedado rezagado. El sector servicios, no corresponde al ideal de una etapa avanzada de desarrollo económico, que implica altos***

salarios debidos a un alto capital humano y sofisticados niveles de especialización, sino más bien a un sector de servicios informales y con baja remuneración¹⁶.

Lo anterior significa que, si se desea un desarrollo económico real, bien sustentado, es necesario retomar el desarrollo industrial venido a menos, y cuidar que alcance apropiados niveles de diversificación, tecnología, calidad y productividad. Se puede ser un país agrícola y turístico, pero sólo la industria avanzada garantiza lo que se requiere para vender no sólo materias primas, si no valor agregado, al mundo y ser menos dependientes de los vaivenes y especulaciones de la economía internacional.

Por último, está el tema de la exportación. Exportar es un reto mayor para cualquier empresa, no se diga para una PYME. Existe poca información sobre montos y destinos de exportaciones de las PYMES ecuatorianas, pero de lo que se halló pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- 1) El nivel de exportación es mínimo. Se estima que sólo el 6% de la producción de las PYMES ecuatorianas se dedica a la exportación¹⁷.
- 2) En el año 2006, sólo el 7% de las PYMES participó en alguna forma de exportación, sea directamente o por medio de terceros¹⁶.
- 3) Las personas naturales tienen menor probabilidad de exportar que las empresas con personería jurídica. Las empresas que capacitan a su personal tienen mayor probabilidad de exportar que aquellas que no lo hacen. Las pequeñas y medianas empresas tienen mayor probabilidad de exportar que las microempresas. Los sectores textiles tienen mayor probabilidad de exportar que los otros sectores¹⁸.

¹⁶ Aguilar, A., Arghoty, A., Burgos, S., Gualavisí, M., Onofa, M., Ruiz, P., Sáenz, M., González, R., Muñoz, L., Sión, V., Zambrano, R., y Díaz, C. (2013). *Estudios industriales de la micro, pequeña y mediana empresa*. Quito; Gráficas V & M.

¹⁷ Stratega (2008). "Informe de resultados de la Encuesta nacional a micro, pequeñas y medianas empresas de la industria manufacturera"

¹⁸ Aguilar, A., Arghoty, A., Burgos, S., Gualavisí, M., Onofa, M., Ruiz, P., Sáenz, M., González, R., Muñoz, L., Sión, V., Zambrano, R., y Díaz, C. (2013). *Estudios industriales de la micro, pequeña y mediana empresa*. Quito; Gráficas V & M.

- 4) Entre los principales factores limitantes para emprender en la exportación está la falta de visión, actitud, interés y entendimiento por parte de los ejecutivos y/o propietarios de las empresas respecto de la importancia estratégica de la exportación¹⁹.
- 5) Otro factor limitante es la falta de investigación y desarrollo al interior de las PYMES, por lo que la creación de nuevos productos y procesos que se adapten a las exigencias externas se complica²⁰.
- 6) Otras desventajas son los precios no competitivos y el escaso desarrollo de Sistemas de Aseguramiento de la Calidad²¹.
- 7) Los destinos de la escasa producción para exportación de las PYMES son: 44% a países de la CAN, 16% a Estados Unidos, y el resto a otros países²².
- 8) En cuanto al resto de la industria (grandes empresas), la exportación fue de 3.018 millones de dólares en 2.008. El 59% fue de productos alimenticios, de bajo valor agregado.

En definitiva, la exportación en el Ecuador tiene un nivel incipiente, especialmente en lo que se refiere a las PYMES. Compárese esta situación con lo ya descrito para México en el año 2001, cuando el 95% de los exportadores fueron PYMES.

En Colombia tienen la teoría de que las PYMES “tienen que internacionalizarse o morir”²³. En ese país el 20% de las exportaciones totales las ejecutan las PYMES. En Taiwán ese porcentaje es del 56%, en Corea es del 40% y en Italia es del 53%. En Ecuador, no llegan al 4%.

Las oportunidades y ventajas que ofrece la exportación están ahí. Las políticas gubernamentales de estímulo también se están desarrollando. La implantación de Sistemas de Gestión de la Calidad es un imperativo si se quiere cumplir con las exigencias del mercado internacional.

¹⁹ Simmonds, K. y H. Smith (1968). “The First Export Order: A Marketing Innovation”. *British Journal of Marketing*, Summer, pp 93-100.

²⁰ Villavicencio J. (2006). “Factores críticos para el desempeño exportador de las MIPYMES”. *Revista TEC Empresarial* 1 Ed. 1. Costa Rica.

²¹ Aguilar, A., Arghoty, A., Burgos, S., Gualavisí, M., Onofa, M., Ruiz, P., Sáenz, M., González, R., Muñoz, L., Sión, V., Zambrano, R., y Díaz, C. (2013). *Estudios industriales de la micro, pequeña y mediana empresa*. Quito; Gráficas V & M.

²² MIPRO, Instituto de Investigaciones Socioeconómicas y Tecnológicas, 2002

²³ <http://www.usergioarboleda.edu.co/pymes/noticia1.htm>

2. LA CULTURA SEIS SIGMA Y LAS PYMES

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. LOS SISTEMAS DE GESTIÓN

Adoptar un Sistema de Gestión significa adoptar una forma de administrar. Administrar las decisiones, administrar las operaciones, administrar la información y administrar el control. Un buen Sistema de Gestión debería administrar todo eso eficientemente.

Los Sistemas de Gestión tradicionales se han orientado preferentemente hacia la obtención de buenos resultados financieros por parte de la empresa: lo que produce utilidad para los dueños o accionistas sirve, y lo que disminuye la utilidad no sirve. Entonces, las decisiones, las operaciones, el manejo de la información y el control se orientaban casi exclusivamente a maximizar las ganancias. Incluso la misma estructura de las organizaciones, por áreas y departamentos, tenían más que ver con la generación de lucro que con la satisfacción de las necesidades del cliente. Posiblemente quien mejor expresó esta situación fue Henry Ford cuando, a principios del siglo XX, dijo: “Los clientes pueden tener su auto del color que deseen, siempre y cuando deseen que éste sea negro”. Semejante propuesta puede entenderse mejor si se la ubica en el contexto en que fue realizada: Ford había logrado bajar el precio del famoso modelo T a poco más de 350 dólares de la época (como USD 4.300 actuales), y su empresa no tenía virtualmente competencia en la fabricación masiva de autos.

Pero, además de su posición de relativa indiferencia hacia las verdaderas necesidades o preferencias de los clientes, los sistemas de gestión con enfoque predominantemente financiero tenían el grave defecto de reportar los problemas a posteriori, cuando todo había ocurrido, sin capacidad práctica de detectar a tiempo las relaciones causa-efecto que actuaban

tras los problemas relacionados con la calidad, la productividad o el costo. Apagando incendios, cuando más, y exhibiendo un nivel prácticamente nulo de pro actividad²⁴.

Por supuesto, este tipo de sistemas de gestión sólo podían durar mientras los clientes – el mercado- estuviesen dispuestos a aceptar lo que las empresas de manufactura o de servicios producían, sin opción a reclamar o a expresar sus preferencias.

Lo que vino a continuación es historia conocida. La competencia aumentó cada vez más, los recursos se pusieron cada vez más caros y escasos, los clientes más exigentes y con más opciones de elección. Y, después, la globalización. A las empresas no les quedó más que empezar a plantearse seriamente la satisfacción del cliente como el único camino confiable para mantener la fidelidad del mercado y para alcanzar, al mismo tiempo, utilidad. Y, en vista de que una buena parte de la satisfacción y fidelidad del cliente lo constituyen los precios bajos, las empresas debieron pensar cada vez más en la disminución de los costos, sin bajar el confort y la calidad obviamente (en esto tuvo una buena ventaja Henry Ford porque logró precios realmente bajos a costa de fabricar autos buenos, pero realmente muy espartanos e incómodos).

Además de esas presiones sobre las empresas, antes conformes con una actitud reactiva ante los problemas, otras fueron añadidas por entidades públicas que buscaban verdaderamente la seguridad y protección del consumidor, aunque no necesariamente su comodidad o deleite. Seguridad, veracidad, normas a cumplir, protección del medio ambiente, seguridad en el trabajo, respeto a la comunidad. Las mismas normas y los protocolos de autorización o certificación llegaron a estar en manos de institutos nacionales, o de federaciones internacionales, como la International Standardization Organization, que reúne a los organismos nacionales de normalización de 157 países del mundo, las normas GPM para la fabricación de fármacos o las normas BIFMA.

²⁴ Pérez, J.A. (2010). *Gestión por Procesos*. Madrid; Esie Editorial.

De hecho, el conflicto entre cumplir con los objetivos de la empresa y cumplir simultáneamente con la satisfacción completa del cliente (y de las partes interesadas) sería un reto difícil de afrontar, con no pocas situaciones conflictivas a resolver. Y a las empresas alrededor del mundo no les quedó más que buscar nuevos Sistemas de Gestión y nuevos Modelos de Gestión, apropiados para enfrentar los nuevos tiempos.

Los **Sistemas de Gestión** (el concepto, la estrategia, el hacia dónde ir), las **Normas y Modelos de Gestión** (el camino, la técnica, la manera de llegar), y las **Metodologías y Herramientas** (los motores que hacen posible el tránsito a lo largo del camino trazado por la Técnica de Gestión elegida) han experimentado una constante evolución en las últimas décadas, hasta alcanzar niveles de eficiencia notable a la hora de empatar la manera en que las partes interesadas esperarían que la organización desempeñe sus actividades (para que entregue el producto o servicio que satisfaga sus necesidades, a cambio de un precio razonable, y respetando la seguridad y salud de los trabajadores, así como al medio ambiente) con la manera en que a los directivos les interesa estructurarla (por departamentos y áreas, fáciles de controlar) a fin de alcanzar sus propios objetivos.

Al presente, se acepta que en la empresa moderna se deben gestionar tres aspectos claves: la Calidad y la Excelencia, la Seguridad y Salud en el Trabajo, y la relación con el Medio Ambiente. Es posible desarrollar Sistemas de Gestión para cada uno de esas áreas de responsabilidad, cada uno apoyado por normas y modelos expofeso:

Sistemas de Gestión de la Calidad o de Gestión de la Excelencia, referenciados por normas o modelos como la norma ISO 9001:2008, el modelo EFQM²⁵ : 2013 o el Modelo Malcolm Baldrige.

Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, orientado por las normas OHSAS 18001:2007.

²⁵ EUROPEAN FEDERATION FOR QUALITY MANAGEMENT

Sistemas de Gestión Ambiental, con las normas ISO 14001:2004 como referencia.

Se ha llegado a desarrollar Sistemas de Gestión Integrados que comprenden el desarrollo armónico de los tres sistemas de gestión mencionados antes, cumpliendo los requisitos mínimos de las normas o siguiendo los lineamientos de los modelos sugeridos.

2.1.2. LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD

Si nos centramos en los Sistemas de Gestión de la Calidad, un resumen satisfactorio de los principios básicos enunciados por cada uno de actuales modelos y normas que son referentes para su implantación es el siguiente:

ISO 9001:2008 (Principios de la calidad)²⁶:

- Organización orientada al cliente
- Enfoque basado en procesos
- Enfoque de sistema para la gestión
- Mejora continua
- Liderazgo
- Participación del Personal
- Toma de decisiones basadas en hechos
- Relaciones mutuamente provechosas con los proveedores

Modelo para la Excelencia EFQM²⁷:

- Orientación hacia los resultados
- Orientación hacia el cliente
- Liderazgo y coherencia
- Gestión por proceso y hechos

²⁶ ISO 9001:2008

²⁷ <http://www.efqm.es/>

- Desarrollo e implicación de las personas
- Proceso continuo de aprendizaje, innovación y mejora
- Desarrollo de alianzas
- Responsabilidad social de la organización

Modelo de Excelencia en la gestión Malcolm Baldrige²⁸:

- Liderazgo visionario
- Excelencia impulsada por el cliente
- Aprendizaje organizacional y personal
- Valoración de las personas y de los asociados
- Agilidad
- Orientación hacia el futuro
- Gestión para la innovación
- Gestión basada en hechos (procesos e indicadores)
- Responsabilidad social
- Orientación hacia la obtención de resultados y creación de valor
- Perspectiva de sistema

Como era de esperar, todos los modelos presentan criterios más o menos parecidos: la orientación al cliente, el liderazgo, el interés por el personal, etc. En este punto, nos interesa resaltar que el principio de la Gestión por Procesos y basada en hechos (datos, información, indicadores, análisis) tiene una presencia constante en esos modelos predominantes, lo cual es un buen indicio de que este principio es, en verdad, muy importante en el logro de la calidad

²⁸ <http://www.slideshare.net/celestino7776/modelo-malcombaldrige>

y la excelencia, sea cual sea el modelo que se considere. La experiencia de miles de empresas, administradores, investigadores y académicos lo ha demostrado a lo largo del tiempo.

Las normas referentes a la implantación de Sistemas de Gestión de la Salud y Seguridad en el Trabajo, y las que orientan la implantación de Sistemas de Gestión Medio Ambiental, mencionan a los procesos de la empresa como algo accesorio, a tenerse en cuenta, pero nada más. Se centran sobre todo en requisitos, políticas, buenas prácticas y procedimientos. La Gestión por Procesos es, en otras palabras, propia de los Sistemas de Gestión de la Calidad.

2.1.3. LA GESTIÓN POR PROCESOS Y LA MEJORA CONTINUA

A la Gestión por Procesos se le ha llamado de diferentes maneras: técnica, herramienta, sistema, modelo, etc. pero parecería que una definición más apropiada es la siguiente: “La Gestión por Procesos no es un modelo ni una norma de referencia, sino un cuerpo de conocimientos con principios y herramientas específicas que permiten hacer realidad el concepto de que la calidad se gestiona, Gestión de la Calidad”²⁹. Se la ha definido también como una estrategia administrativa sistémica que permite identificar, comprender y aumentar el valor agregado de los procesos de la empresa para cumplir con los objetivos del negocio y elevar el nivel de satisfacción del cliente³⁰.

La Gestión por Procesos es una estrategia administrativa que da forma al concepto moderno de que la calidad en la empresa ya no se controla ni se asegura, si no que se gestiona. Y como metodología que es, su cuerpo de conocimientos y herramientas ha sido motivo de publicaciones de libros, de desarrollo de investigaciones y del estudio de asignaturas en las universidades. En el presente trabajo se considera que el lector tiene conocimientos de la Gestión por Procesos, pues está fuera del alcance del mismo profundizar en su descripción y análisis.

²⁹ Pérez, J. A. (2010). *Gestión por Procesos*. Madrid, Esie Editorial.

³⁰ Bravo, J.(2009). *Gestión por Procesos*. Santiago de Chile; Evolución S.A.

2.1.4. METODOLOGÍAS RELACIONADAS CON LA GESTIÓN POR PROCESOS

“El concepto calidad tiene ahora un *alcance global* al abarcar a todas las actividades empresariales, operativas, de apoyo, de gestión y de Dirección; ello es debido a que se entiende por producto el resultado del trabajo de cualquier persona y por cliente al destinatario de ese trabajo”³¹. Es decir, una característica central de la Gestión por Procesos es que su alcance es global, abarcando a toda la organización, y considerando que todos los niveles de la misma actúan por medio de procesos, desde los niveles misionales y de apoyo, a los niveles estratégicos y de decisión a largo plazo. Los procesos que operan en todos los niveles están finalmente orientados a un mismo objetivo: la satisfacción del cliente, motivo de la existencia de la empresa. Por lo mismo, todos los procesos deberían estar sometidos a una constante mejora continua y a la búsqueda del incremento del valor agregado que generan y que finalmente llega al cliente.

Cuando se analizan los caminos adecuados para emprender un proyecto de Mejora de Procesos, el administrador se encuentra con que, en la actualidad, se dispone de un enorme arsenal de herramientas, prácticas y técnicas desarrolladas para medir y mejorar los procesos. Hay tal cantidad, que uno puede llegar a sentirse realmente abrumado ante la variedad de opciones que se pueden tomar. Algunas requieren de un real entrenamiento para poder ser comprendidas y aplicadas exitosamente.

Utilizadas de forma coherente y sistemática, las herramientas, prácticas y técnicas pueden llegar a constituir una metodología. Usualmente, en las facultades de administración e ingeniería se las enseña de forma independiente, en diferentes asignaturas y niveles, de manera que, si bien son un buen sustento para aprender posteriormente una metodología que

³¹ Pérez, J. A. (2010). *Gestión por Procesos*. Madrid, Esie Editorial.

las integre, hasta tanto el estudiante las mira como capítulos separados y a veces inconexos, no llegando a estructurar en su mente un mecanismo completo, articulado y de uso práctico evidente.

Por eso mismo fueron apareciendo las metodologías orientadas específicamente a la Mejora de Procesos. Por supuesto, no existe una metodología universal, en el sentido de que algunas son más adecuadas que otras para un determinado tipo de negocio. Por ejemplo, la metodología AGILE se desarrolló a principios del siglo XXI orientada a la mejora continua de procesos en el desarrollo de software de alta calidad. Es una metodología especializada, orientada a un tipo específico de negocio.

Algunas metodologías pueden tener un amplio horizonte, que incluya a la Mejora de Procesos entre sus objetivos o sus estrategias de trabajo, pero siempre que una metodología proponga índices y medidas (metrología) debe pensarse en que ella buscará medir y mejorar procesos, o actividades. Dentro de esa consideración, algunas de las metodologías que incluyen o se dedican exclusivamente a la Mejora de Procesos se resumen en la Tabla 4. Allí se aprecia que pueden haber algunas más amplias en sus objetivos, aunque la Gestión por Procesos sea central en su operación (es el caso del BALANCED SCORE CARD); o le sirven más que nada de apoyo operacional, al automatizarla (BPM); se orientan a los servicios (sSCM-SP); o al desarrollo de Software (AGILE, CMMI, COBIT, ITIL, MOPROSOFT); o están diseñadas para apoyar la gestión de proyectos (PMBok).

Existen otras metodologías, como GQM (Goal Question metric) , PSP/ TSP (Personal Software Process / Team Software Process), RUP/UML (Unified Modeling Language), SOA (Service Oriented Architecture), SWEBoK (Software Engineering Body of Knowledge)³². Todas ellas están orientadas a las organizaciones que desarrollan software. De hecho, la mayoría de

³² <http://asprotech.blogspot.com/2012/03/modelos-normas-metodologias-y-tecnicas.html>

metodologías creadas en los últimos años se han dedicado a los procesos de desarrollo de sistemas informáticos.

2.1.5. VENTAJAS DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA

Por supuesto, existen diversos caminos para mejorar procesos, no sólo la Metodología Seis Sigma, ni mucho menos. De hecho, empresas como la Toyota han alcanzado elevadísimos niveles de calidad, o sea de mejora de sus procesos productivos, con sus propias herramientas y sistemas (por ejemplo, el TPS Toyota Production System). Lo que ocurre con la metodología Seis Sigma es que ofrece un camino objetivo, basado en datos y hechos, que utiliza herramientas conocidas por todos, repetible y confirmable en sus procedimientos y resultados. Es una metodología muy fuerte en el uso de herramientas estadísticas y está basada siempre en evidencia sustentable. Ninguna otra metodología maneja, por ejemplo, el Diseño de Experimentos, la herramienta estadística de mayor valor en la actualidad para este tipo de objetivos. Por ello, obtiene resultados medibles en plazos relativamente cortos.

Todo ello la hace valiosa para apoyar a cualquier tipo de organización, sea ésta productora de bienes o servicios, e incluso de software. Probablemente a eso se debe que, al presente, el 53% de las empresas Fortune 500 la han adoptado para sus Sistemas de Gestión de la Calidad, y el 82% de las Fortune 100. De hecho, se ha publicado que en los pasados 20 años la metodología Seis Sigma ahorró USD 427 mil millones a las empresas Fortune 500³³ (casi USD 2.000 millones al mes).

³³ [http://www.reliableplant.com/Read/4285/report-finds-six-sigma-has-saved-fortune-500-\\$427b](http://www.reliableplant.com/Read/4285/report-finds-six-sigma-has-saved-fortune-500-$427b)

Tabla 4.1:
Metodologías relacionadas con la mejora de procesos (A-B)

METODOLOGIA	ORIGEN	AÑO DE CREACION	DESCRIPCION	CONCEPTO RAIZ	OBJETIVO
AGILE	Manifesto for Agile Software Development	2001	Grupo de técnicas de desarrollo de software basado en desarrollo iterativo a través de la colaboración de equipos interdisciplinarios auto-gestionados. Basado en 20 principios.	Métodos Ágiles que promueven la disciplina, la inspección frecuente, la adaptabilidad, el trabajo en equipo, la auto-organización, la rendición de cuentas y el uso de las mejores prácticas de ingeniería	Entrega rápida de software de alta calidad.
BALANCED SCORECARD	ROBERT KAPLAN Y DAVID NORTON	1992	Metodología que mide el resultado de las actividades de la empresa en términos de su Misión, Visión y Estrategia.	Medición en las Perspectivas: Financiera, del Cliente, de Procesos Internos y de Aprendizaje y Crecimiento.	Establecer los objetivos e índices necesarios para cumplir con el Plan Estratégico.
BPM (Business Process Management)	ORGANIZACIÓN BPMI	2005	Metodología que apoya la definición, análisis, ejecución, monitoreo y control de los procesos de la organización. Incluye herramientas de simulación y optimización.	Integrar en un Sistema tipo Workflow el flujo de los procesos con la interacción humana y con la acción de los sistemas que afectan a esos procesos. Las aplicaciones usadas son amigables con el usuario.	Proporcionar un software que brinde a los interesados en los procesos una notación común que facilite su gestión. Automatizar procesos.
Fuente original: http://asprotech.blogspot.com/2012/03/modelos-normas-metodologias-y-tecnicas.html					

Tabla 4.2:

Metodologías relacionadas con la mejora de procesos (C-E)

CMMI (Capability Maturity Model for Integration - Modelo Integrado de Madurez y Capacidad)	CMMI INSTITUTE (Especialistas de la industria, el gobierno EEUU y el Software Engineering Institute (SEI))	2006	El enfoque de esta metodología permite evolucionar desde un proceso en crisis a un proceso controlado, estandarizado, medido y optimizado que sienta las bases de la mejora continua, pero cada empresa debe buscar y adaptar a su realidad las herramientas, metrica, estándares y metodologías que juzgue pertinentes.	Es una metodología para procesos que sugiere aplicar las mejores prácticas de la industria para el desarrollo, mantenimiento, adquisición y operación de productos y servicios.	Servir como guía para la implementación de las prácticas óptimas de la industria para mejorar los procesos de las organizaciones. (La han adoptado preferente compañías que desarrollan software)
COBIT (Control Objectives for Information and related Technology)	ISACA con ITGI	1996, actualizado 2007	COBIT es una metodología aceptada mundialmente para el adecuado control de proyectos de tecnología, los flujos de información y los riesgos que éstas implican.	Conjunto de mejores prácticas para la tecnología de la información (TI)	Ofrecer a los gerentes, auditores, y usuarios de TI un conjunto de medidas generalmente aceptadas, indicadores, procesos y mejores prácticas para ayudarles a maximizar los beneficios procedentes de la utilización de tecnología de la información
eSCM-SP (eSourcing Capability Model for Service Providers)	Carnegie Mellon University	2002	eSCM-SP es una metodología que define 84 practicas referentes al manejo exitoso de asociaciones de aprovisionamiento (partnerships). El eSCM-SP ha sido diseñado para complementar otras metodologías referentes a la calidad en el servicio.	Las 84 prácticas son abiertas en tres dimensiones, referente a ciclo de vida y a capacidad. Considera 10 áreas concernientes a la gestión de la capacidad: (conocimiento, gente, desempeño, relaciones, tecnología, amenazas, contratación, diseño y desarrollo del servicio, entrega del servicio y transferencia del servicio).	Dar a los proveedores de servicios una orientación que les ayude a mejorar su capacidad de abastecimiento en todo el ciclo de vida del servicio, para diferenciarse de sus competidores y para proporcionar a los clientes un medio objetivo para evaluar la capacidad de los proveedores de servicios.
Fuente original: http://asprotech.blogspot.com/2012/03/modelos-normas-metodologias-y-tecnicas.html					

Tabla 4.3:
Metodologías relacionadas con la mejora de procesos (I-S)

ITIL (Information Technology Infrastructure Library)	Gobierno del Reino Unido	1989 - ultima versión 2007	Marco de trabajo de las buenas prácticas destinadas a facilitar la entrega de servicios de tecnologías de la información.	ITIL fue desarrollada al reconocer que las organizaciones dependen cada vez más de la Informática para alcanzar sus objetivos corporativos. Esto ha dado como resultado una necesidad creciente de servicios informáticos de calidad que se correspondan con los objetivos del negocio, y que satisfagan los requisitos y las expectativas del cliente.	Servir de base para consulta, educación y soporte de herramientas de software. Actualmente es un estándar mundial.
MOPROSOFT (Programa para el Desarrollo de la Industria del Software)	Asociación Mexicana para la Calidad en Ingeniería de Software	2002	Metodología de Procesos para la Industria del Software, enfocado en la mejora y evaluación de los procesos de desarrollo y mantenimiento de sistemas y productos de software, especialmente orientado al sector PYME.	Moprosoft apareció debido a que la Secretaría de Economía de México consideraba que los modelos de evaluación y mejora CMMI e ISO no resultan apropiados para empresas pequeñas y medianas de desarrollo y mantenimiento de software.	"Alcanzar niveles internacionales en capacidad de procesos"
PMBok	PMI (Project Management Institute)	1987	Guía estándar en la gestión de proyectos. Provee documentación y estandarización de la información y prácticas aceptadas por la gestión de proyectos. Ampliamente aceptada por ser el estándar en la gestión de proyectos.	Una buena gestión de proyectos es indispensable para los resultados del negocio	Proveer referencias básicas a los interesados en la gestión de proyectos
SIX SIGMA	Bill Smith (Motorola)	1983	SIX SIGMA es una metodología orientada a la MEJORA DE PROCESOS, centrada en la reducción de la variabilidad de los mismos. Aplicable a organizaciones productoras de bienes o servicios.	Medir estadísticamente la capacidad y variabilidad de los procesos. Usar métodos estadísticos para encontrar y eliminar las fuentes de variabilidad	Permitir un máximo de 3,4 defectos por millón de eventos u oportunidades.

Fuente original: <http://asprotech.blogspot.com/2012/03/modelos-normas-metodologias-y-tecnicas.html>

2.2. INTRODUCCIÓN A SEIS SIGMA

- *El foco de Seis Sigma cambió de la calidad del producto a la calidad del negocio³⁴.*
- *Seis Sigma mide y refleja estadísticamente la capacidad real de los procesos, correlacionándolos con características como los defectos por número de unidades, o como la probabilidad de éxito o de fallo.³⁵*
- *La Calidad es inversamente proporcional a la variabilidad.³⁶*
- *Seis Sigma es una metodología con base estadística, fundamentada en el método científico, orientada a la optimización de procesos y a la solución de problemas, tales que permitan reducir la variación tanto en productos como de procesos. Todo ello encaminado a lograr la satisfacción total del cliente.³⁷*
- *De un proceso Seis Sigma deben esperarse aproximadamente 3.4 Defectos por Millón de las Oportunidades en que ese proceso ocurra (DPMO). En la actualidad ese nivel de defectos es un estándar de clase mundial³⁸.*
- *Los requisitos de una implantación exitosa de Seis Sigma deben ser:*
 1. *Auténtica orientación al cliente*
 2. *Gestión orientada por datos y hechos*
 3. *Orientación a procesos, gestión por procesos y mejora de procesos*
 4. *Gestión proactiva - preventiva*
 5. *Colaboración sin fronteras, trabajo en equipo*
 6. *Búsqueda de la perfección – Mejoramiento continuo³⁹.*

³⁴ <http://www.ijoart.org/docs/Barriers-for-implementation-of-Six-Sigma-by-Small-and-Medium-Enterprises.pdf>

³⁵ Brue, G. (2003). Seis Sigma para Directivos. Madrid; McGraw-Hill.

³⁶ Montgomery, D. (2004). Control estadístico de la Calidad. México, D.F.; Editorial Limusa S.A.

³⁷ CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

³⁸ Pyzdek, T., y Keller, P. (2010). The Six Sigma Handbook. USA; McGraw-Hill.

³⁹ Pande, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2004). Las claves prácticas de Seis Sigma. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

2.2.1. LA HISTORIA

El origen de Seis Sigma se remonta a 1.983, en Motorola, cuando el ingeniero Bill Smith pensó que si ocurrían defectos durante la producción, aunque ellos fueran detectados y corregidos, seguramente otros defectos no serían detectados por la empresa, pero sí después por los clientes. Pensó que probablemente los niveles de defectos detectados por el control final de calidad eran inferiores a los fallos reales ocurridos en los procesos de producción. La única solución era la fabricación de productos totalmente libres de defectos.

A continuación, basado en las ideas de Smith, Mikel Harry, ingeniero muy hábil en el uso de la estadística, se planteó la estrategia de medir las variaciones de los procesos de producción en Motorola. El promedio simplemente es irrelevante, pues lo que sienten finalmente los clientes son las variaciones. Por ejemplo, para una persona esperando servicio en la cola frente a la ventanilla de un banco podrían ocurrir los siguientes tiempos de espera:

Primera espera: 8 minutos

Segunda espera: 5 minutos

Tercera espera: 2 minutos

Cuarta espera: 20 minutos

Quinta espera: 7 minutos

Podría asegurarse que el tiempo promedio de espera de un cliente cualquiera es de 8,4 minutos, y que durante ese tiempo deberá aproximadamente estar en la cola, pero para el cliente no es así. A veces el tiempo es tan corto como dos minutos, o tan largo como 20. Y eso es lo que siente el cliente. Los clientes sienten la variación, y les molesta la incertidumbre.

La decisión de **medir variaciones** fue todo un acierto, y cuando Harry actuó sobre los procesos en los que detectó mayor variación, y los controló usando herramientas estadísticas, el éxito fue inmediato y notable. La compañía se comprometió de inmediato en el desarrollo de esta metodología. En 1988 Motorola ganó el premio Malcom Baldrige.

La segunda empresa americana interesada en la metodología Seis Sigma fue Allied-Signal. Empresa resultante de la fusión de tres compañías en problemas (Allied Chemical Company, Bendix y Signal Company), dedicada a la fabricación de componentes para la industria aeroespacial y automotriz, y a la producción de químicos. En 1991 presentaba un flujo negativo de USD 435 millones al año. Fue entonces cuando la junta de accionistas decidió contratar a Lawrence Bossidy, ex-discípulo de Jack Welch en General Electric (elegido por Fortune como el Manager del Siglo), para dirigir la firma. Bossidy planteó varias estrategias para salvar a la empresa, y una de ellas fue administrarla bajo los criterios de la Calidad Total. Implementó estrictas medidas financieras, vendió filiales, bajó la planilla de 100.000 a 88.000 empleados e implementó Seis Sigma. En agosto de 1993, Bossidy declaró que las utilidades de la compañía en el segundo trimestre de ese año ascendían a 170 millones de dólares. Hoy se reconoce que el incremento de utilidades y el consecuente éxito de la empresa se debieron en enorme medida a la implantación de la metodología Seis Sigma.

Durante un almuerzo, en 1995, Jack Welch se mostró muy interesado en conocer cómo Bossidy había conseguido un éxito tan espectacular en el reposicionamiento de Allied-Signal. Este le comentó respecto de Seis Sigma e inmediatamente Welch le invitó a dar una charla respecto de la metodología en General Electric. De buen grado, Bossidy acudió al centro de entrenamiento de los ejecutivos de General Electric en Crotonville, y el resultado de esa reunión fue que para fines de ese mismo año GE había decidido adoptar la metodología Seis Sigma, para toda la corporación.

Los éxitos de Seis Sigma en General Electric opacaron los de Motorola y Allied-Signal. Jack Welch ha descrito detalladamente en su autografía – “Hablando Claro” - los éxitos más relevantes originados por la implantación de Seis Sigma en GE. Por ejemplo, la división de plásticos GE PLASTICS nunca pudo vender a la Sony policarbonatos para la fabricación de CD’s, debido a que esta última exigía parámetros de pureza inalcanzables para esa división. No lo

podía hacer trabajando a un nivel de 3,8 sigma, pero después de aplicar la metodología el nivel subió a 5,7 sigma y GE PLASTICS pudo firmar el contrato con Sony.

Otro caso interesante mencionado es el de GE POWER SYSTEM, que producía turbinas cuyos rotores fallaban por el apareamiento de vibraciones elevadas. Hasta la tercera parte de los rotores debían ser reemplazados antes de salir de la fábrica. Después de la aplicación de la metodología, y hasta la publicación del libro de Welch, en 2002, ningún rotor había tenido que ser reemplazado.

En 1998 GE Medical System introdujo en el mercado un nuevo escáner para diagnóstico médico. El precio de venta por unidad superaba el millón de dólares. El escáner fue desarrollado íntegramente bajo los principios Seis Sigma. Se logró bajar el tiempo de escaneado de 180 segundos, lo normal en este tipo de aparatos, a sólo 17 segundos.

Sin agotar los casos mencionados por Welch, detallamos por último el caso de GE CAPITAL, que tenía problemas en el negocio de las hipotecas, básicamente por el tiempo que se tardaba en atender a los clientes. Cuando se empezó, los clientes tenían éxito en contactarse con un representante de la división sólo en el 75% de los casos. Después de trabajar con la metodología Seis Sigma, la eficiencia de contacto subió a más del 99%.

En menos de dos años, GE obtuvo ahorros por cerca de USD 300 millones. Para 1998, los ahorros subieron a USD 750 millones, y se proyectó subir el ahorro para el año siguiente a USD 1.000 millones.

2.2.2. SEIS SIGMA, CALIDAD Y BALANCED SCORECARD

El concepto de "Calidad" (del griego *Kalos* = *lo bueno, lo apto*) ha variado a lo largo cerca de 150 años de historia de producción de bienes y servicios en el mundo. En pocas palabras, la Calidad se ha definido como la aptitud para el uso, o qué tan bien un bien o servicio

cumple con las expectativas del cliente⁴⁰, pero en realidad el concepto de calidad ha tenido un todo proceso de evolución, como puede verse en la Tabla 5. Seis Sigma está vinculada a los conceptos más modernos respecto de lo que la calidad debe representar en la gestión de una compañía.

Tabla 5:
Etapas de evolución del concepto de la calidad

AÑO	CARACTERÍSTICA DE LA ETAPA	SUSTENTO DE LA CALIDAD
1880	Artesanal – No importa el costo de la calidad	Habilidad y capacidad del operador
1900	Revolución Industrial– Producción en masa – La calidad es secundaria	Evaluación del supervisor
1920	Es importante cumplir con las especificaciones del cliente	Detección de defectos al final de la línea de producción – Aparece el inspector de calidad - Control por Inspección del 100% de los productos terminados.
1940	Estadística como secreto militar	Control estadístico de la Calidad (muestreo) - Normas que unifican los criterios de calidad – La inspección sigue siendo prioritaria.
1960	Calidad y Productividad Acciones preventivas durante el proceso productivo	Primer acercamiento a la Calidad Total (Dr. Armand Feigenbaum), como un sistema que implica a toda la organización – Aparecen los departamentos de Control de Calidad - Control en los procesos.
1980	Aseguramiento de la calidad (ISO 9000)	La calidad empieza desde el diseño
2000	Mejora continua	Sistemas de Gestión de Calidad– Excelencia o Calidad Total

Fuentes: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014
<http://www.monografias.com/trabajos99/evolucion-calidad/evolucion-calidad.shtml>

Seis Sigma es una metodología orientada hacia la Calidad Total y a la Mejora Continua. De hecho, es una de las metodologías que mejor apoyan a los Sistemas de Gestión de la Calidad. Ya se ha comentado que el 82% de las compañías Fortune 100 la tienen como forma de cultura

⁴⁰ <http://www.swdsi.org/swdsi08/paper/SWDSI%20Proceedings%20Paper%20S753.pdf>

organizacional orientada a la calidad (el 47% de las Fortune 100 tienen certificación ISO 9000⁴¹), y el 53% de las Fortune 500. Su éxito a nivel mundial no puede sino calificarse de excepcional.

Otro aspecto positivo, resaltado por Jack Welch, es que Seis Sigma y el Balanced Scorecard son metodologías que se complementan perfectamente en cualquier organización que las adopte. El BSC fue desarrollado por Kaplan y Norton en 1996, y propone cuatro perspectivas para medir de forma integrada el desempeño de la organización: la financiera, el cliente, los procesos internos y el aprendizaje-crecimiento. El BSC proporciona un marco referencial que permite (1) describir una estrategia adecuada para crear valor y (2) alinear los recursos de la empresa hacia la ejecución exitosa de esa estrategia. Seis Sigma apoya al BSC ejecutando la estrategia por medio del uso de datos y herramientas de mejora de procesos. El BSC es la brújula, y Seis Sigma es el combustible. Mientras el BSC mira hacia la estrategia global y a largo plazo. Seis Sigma mira las estrategias referida a desempeños específicos que deben mejorarse en el corto plazo⁴².

2.2.3. SEIS SIGMA, TQM, TPS Y LEAN PRODUCTION

TQM (Total Quality Management) ha sido traducido como Gestión de la Calidad Total, Gestión Total de la Calidad, Administración de la Calidad Total, Calidad Total o Sistemas de Calidad Total. Y una definición simple y conocida, desarrollada por el Dr. Kaoru Ishikawa, es: “TQM es filosofía, cultura, estrategia o estilo de gerencia de una empresa, según la cual todas las personas en la misma estudian, practican, participan y fomentan la mejora continua de la calidad”. Tanto los significados como la definición dicen mucho y poco a la vez.

Está claro que TQM y Seis Sigma persiguen lo mismo, pero TQM es en sí mismo un concepto vago, y es quizás por eso que han aparecido tantos TQM's, tantos como empresas han adoptado esta filosofía de gerenciar. Cada organización ha hecho su propia versión. La

⁴¹ <http://www.swdsi.org/swdsi08/paper/SWDSI%20Proceedings%20Paper%20S753.pdf>

⁴² Pana, J., Cheng, M. (2008). An Empirical Study for Exploring the Relationship between Balanced Scorecard and Six Sigma Programs. *Asian Pacific Management Review*, 13 (2), 481-496.

experiencia ha ido demostrando que la mayor parte de las iniciativas de implantación de TQM ha terminado a la larga en fracaso. Quienes critican TQM hablan de que conceptos tales como “calidad”, “satisfacer al cliente”, “compromiso con la excelencia” o “bien a la primera vez” son definidos de forma nebulosa y vaga. Incluso critican su escasa relación con los resultados financieros de la empresa, por lo que TQM está usualmente entre los primeros candidatos a desaparecer en la primera campaña de baja de costos. No existe una estrategia clara respecto de los procesos sobre los cuales trabajar, y se desperdician esfuerzos y recursos. Tampoco se entrenan personas específicamente capacitadas en las actividades de mejora.

Por su parte, los defensores de Seis Sigma opinan que todos esos problemas son superados ampliamente por esta metodología, que además es bien estructurada, cuantificada, concreta, basada en el método científico, y que usualmente llega para quedarse⁴³.

Para un tipo de pensamiento orientado por el método científico, las razones en favor de Seis Sigma podrían estar clarísimas, pero hay que considerar que no todos pensamos de la misma manera, al punto de que la Toyota, por ejemplo, no quiere saber de Seis Sigma, no utiliza métodos estadísticos para resolver sus problemas, ni considera siquiera el concepto de variabilidad en los procesos, y sin embargo ha alcanzado el éxito que ha alcanzado. A lo más le da a esta metodología la categoría de una herramienta más, pero no se sabe si ha llegado a considerarla en serio su adopción.

A muy breves rasgos, el Sistema de Producción de la Toyota (TPS), equivalente a Lean Manufacturing o Lean Production, está basado en la creación de valor y en el análisis del flujo productivo continuo. Está enfocado en remover la basura (lo que no es necesario para producir el bien o servicio) y en la mejora continua. Flujo y esbeltez en vez de estadística. Las conocidas herramientas orientales (5S, 5G, 5T, etc. también usadas por Seis Sigma) son suficientes para la Toyota, que en efecto ha alcanzado niveles traducidos de 5 y 6 sigma en sus procesos. Quienes defienden este sistema critican de Seis Sigma la excesiva cantidad de datos que pide y los niveles

⁴³ <http://web.cortland.edu/matresearch/SeisSigma.pdf>

de conocimiento requerido para procesarlos, así como la tremenda estructura y costo de los equipos humanos dedicados a mejorar procesos.

El archirrival de Toyota, la General Motors, por su lado, tiene implantada la metodología Seis Sigma, y utiliza ampliamente el análisis estadístico y el Diseño de Experimentos, al igual que grandes empresas como la Ford, General Electric, Motorola, Polaroid, Sony, Black & Decker, Dupont, Dow Chemical, FedEx, Toshiba, Kodak, Texas Instruments, 3M, Amazon, Bank of America, Boeing, Caterpillar, Sears, Xerox, Pfizer, Merck, Abbott, Apple, Bristol-Mayer, Citigroup, Home Depot, Honda, IBM, Nokia, Samsung, la Armada de los E.U. y la misma NASA. Se han suscitado extensas discusiones en línea respecto de cuál de las metodologías es la más apropiada para una empresa de manufactura. Parecería que las dos no son nada más que caminos diferentes para alcanzar el mismo resultado, sólo que el TPS parecería ser más adecuado para una cultura paciente y observadora como la japonesa⁴⁴.

Podrían argüirse dos puntos en favor de la metodología Seis Sigma: (1) que es igual de eficiente cuando se aplica a empresas de servicios; y (2) que ha permitido a empresas que trabajaban en niveles 3 – 4 sigma subir la capacidad de todos sus procesos a niveles 6 sigma en cuestión de pocos años (Motorola lo hizo en cinco, GE en poco menos de diez), comparados con las décadas que ha llevado a la Toyota hacer lo mismo (ver Figura 6).

El método científico posiblemente termine imponiéndose, usando siempre las herramientas propias del TPS como parte de las estrategias de aproximación e identificación de los factores poco vitales, causantes de la variabilidad de los procesos. Todo ello sin dejar de puntualizar que, con niveles Seis Sigma y todo, tanto la Toyota como GM han tenido serios problemas de calidad en sus vehículos en los últimos tiempos.

⁴⁴ <http://www.linkedin.com/groups/Toyota-Production-System-versus-Six-117127.S.209069888>

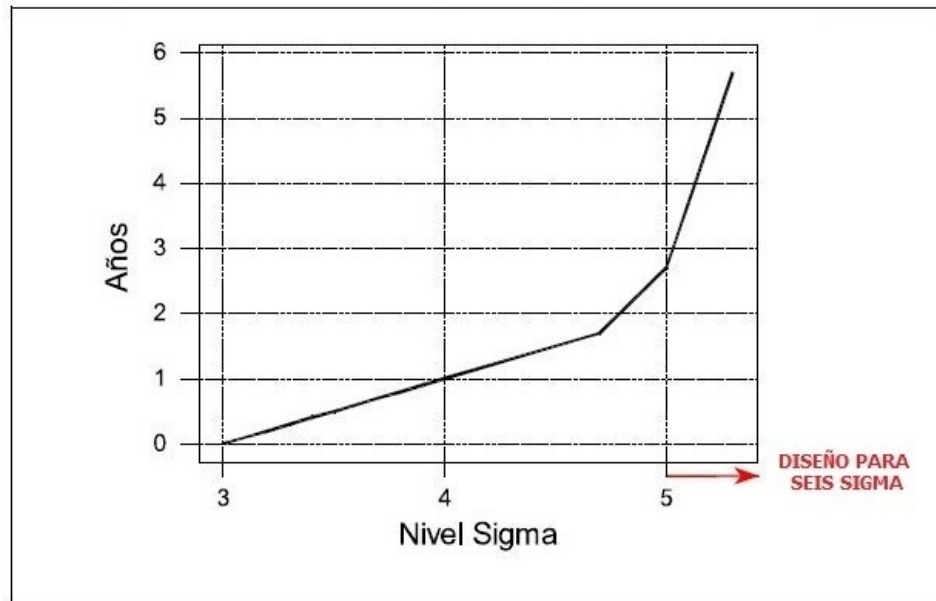


Figura 6: Tiempos normales para alcanzar niveles sigma

Fuente: <http://web.cortland.edu/matresearch/SeisSigma.pdf>

En efecto, en febrero de 2014 el Departamento de Justicia de Estados Unidos obligó a la automotriz japonesa a pagar USD 1.200 millones como multa por los problemas de brusca aceleración no intencional en varios de sus modelos, entre ellos el Lexus y el Prius, mismos que produjeron varios accidentes con víctimas mortales. Y la gigante automotriz americana ha llamado a revisión a casi 16 millones de sus vehículos, en todo el mundo, debido a problemas de ignición y de suspensión repentina del sistema de airbags.

No todo está dicho aún en la búsqueda de la calidad.

2.2.4. PROCESOS, ACTIVIDADES Y TAREAS

Todos los Sistemas de Gestión de la Calidad están orientados hacia la Mejora Continua. Uno de los ocho Principios de la Calidad de la ISO 9001 dictamina que es el Sistema de Gestión de la Calidad implementado en la empresa el que debe mejorarse continuamente, lo cual es una recomendación bastante general. En este trabajo se enfocará Seis Sigma como orientada básicamente a la mejora continua de un proceso o de un conjunto de procesos, sean éstos operativos o de apoyo. Pero si bien la unidad discreta de trabajo de Seis Sigma es el proceso, es necesario resaltar que todo trabajo de mejora continua debe gestionarse como un **proyecto de**

empresa⁴⁵. Esta precisión es necesaria porque debe tenerse presente que los proyectos son únicos y los procesos son repetitivos, y deben tratarse de manera diferente. Seis Sigma se ha utilizado también para mejorar productos, y para diseñar procesos o productos nuevos.

Proceso.- ISO 9000 define el proceso como un *“conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados”* (Ver Figura 7). Podría ampliarse la definición indicando que la interacción de las actividades debería darse de manera que ocasionen la salida de un producto con valor para el cliente, los accionistas, el personal, los proveedores o la sociedad. Si un proceso entrega resultados sin valor, debe eliminarse o debe mejorarse.

Actividad.- Se define como el conjunto de **Tareas** repetitivas que deben ejecutarse para alcanzar un efecto deseado.

Desde esta perspectiva, un **Sistema** puede definirse como el conjunto de **Procesos** que permiten alcanzar Objetivos (Ver Figura 8).

El análisis de procesos y el desarrollo de proyectos de mejora es parte del Protocolo Seis Sigma, y se estudia en detalle más adelante.



Figura 7: Estructura de un proceso
Elaborado por: Bolívar Córdor

⁴⁵ Pérez, J. A. (2010). Gestión por Procesos. Madrid, Esie Editorial.



Figura 8: Estructura de un sistema

Fuente: Pèrez, J.A. (2010). Gestión por Procesos. Madrid; Esie Editorial.

Una vez que un proceso o un producto ha sido mejorado, es importante que en el futuro los avances obtenidos se mantengan controlados dentro de límites estrictamente definidos, es decir es importante que **no varíen**. De hecho, actualmente se estima que la calidad es inversamente proporcional a la variabilidad de los procesos implicados en la producción de un bien o servicio.

2.2.5. DEFECTOS Y COSTO DE LA CALIDAD

Defecto es cualquier característica de un producto o servicio que no cumple con los requisitos del cliente⁴⁶. Cuando un proceso varía más allá de ciertos límites, aparecen problemas relacionados con la presencia de productos o servicios defectuosos, que no cumplen con los requisitos de los clientes o con las especificaciones de la gerencia, y que por tanto deben ser reprocesados, reemplazados o desechados. Pueden aparecer también problemas relacionados con retrasos que molestan al cliente externo o interno y que conllevan reacomodos. Las variaciones están relacionadas también con el apareamiento de desperdicios. Cualquiera de esas consecuencias implica costos para la empresa. Son los costos de la calidad (de la no calidad

⁴⁶ Pande, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2004). Las claves prácticas de Seis Sigma. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

sería una acepción más precisa), y desde la perspectiva de la metodología Seis Sigma, la relación “costo de la calidad vs. nivel de la calidad” puede hacerse más fácil de apreciar si se convierte en la relación “costo de la calidad vs. nivel sigma alcanzado”, tal como se ve en la Figura 9.

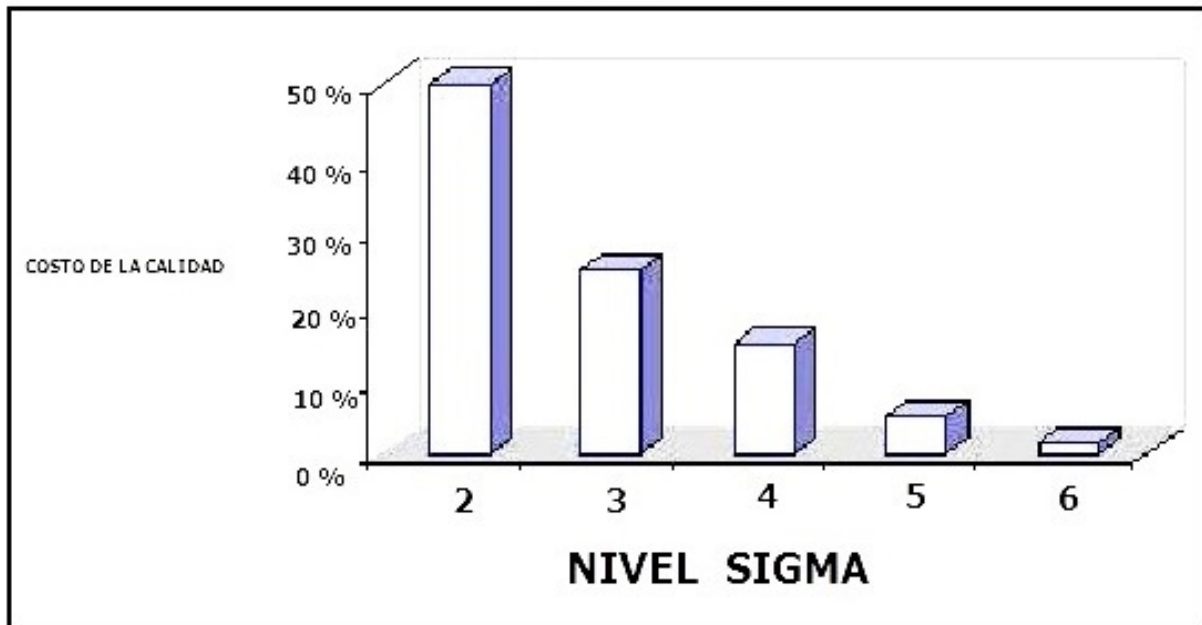


Figura 9: Costo de la calidad como porcentaje del ingreso

Fuente: http://qualityamerica.com/Knowledgecenter/leansixsigma/does_six_sigma_work_in_smaller_companies_.asp

En el apartado correspondiente a la Métrica Seis Sigma se aprenderá cómo se relacionan los niveles sigma alcanzados por una empresa con los niveles de defectos que se pueden esperar cuando ella ejecuta los procesos que generan bienes o servicios. Por ahora, basta mencionar que cuando una empresa trabaja a un nivel 2 sigma (2σ) puede esperar estadísticamente como 290.000 defectuosos por cada millón de oportunidades en que ocurren sus procesos, y que el costo de subsanar esos defectos significa para la empresa cerca de la mitad de sus ingresos por ventas. Cuando la empresa alcanza un nivel seis sigma (6σ), se pueden esperar 3,4 DPMO – 3.4 defectuosos por millón de oportunidades-, y un costo correspondiente por ellos de entre el 1% y 2% de las ventas. En las empresas promedio, que no han implantado Seis Sigma, en el primer

mundo, se ha encontrado que trabajan a niveles de entre **3 y 4 σ** , con un costo asociado de la calidad de entre un 15% y un 25% de los ingresos por ventas.

A partir de algunos casos particulares de aplicación de la metodología Seis Sigma en Ecuador en los cuales se ha medido el Nivel Seis Sigma de Partida (Línea de Base) puede estimarse que la empresa ecuatoriana grande opera a niveles que están entre **2,5 y 4,2 σ** sigma^{47 48}. Seguramente las PYMES operan a niveles menores.

2.2.6. EL EQUIPO SEIS SIGMA

Además de las actitudes, el protocolo y las herramientas estadísticas requeridos por la metodología Seis Sigma, su correcta implantación requiere de una infraestructura de equipo humano orientado al rediseño de la organización. Es obligatorio desarrollar siete funciones y roles:

1. **El consejo directivo.-** Formado por los altos directivos de la empresa. Crea una visión, fija objetivos, exige resultados medibles. Comunica resultados.
2. **El “champion” (patrocinador) de los proyectos.-** Directivo que propone y supervisa un proyecto Seis Sigma. Es el responsable frente al consejo directivo, aprueba cambios, consigue recursos y elimina barreras.
3. **El responsable de la implantación o Director Seis Sigma.-** Gestiona día a día el trabajo Seis Sigma. Dependiendo de la complejidad del proyecto, puede ser una persona o un grupo de personas. Recluta personal para el proyecto y coordina su capacitación. Documenta la implementación del proyecto.

⁴⁷ <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4938/1/UPS-QT02853.pdf>

⁴⁸ <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5395/1/AC-COMPUTACI%C3%93N-ESPE-033210.pdf>

4. **El “Master Black Belt” o Tutor de Seis Sigma.**- Ayuda, pero no interfiere con los jefes de proyecto. Apoya en la correcta utilización de las herramientas estadísticas. en la gestión del cambio y en las estrategias de diseño de procesos. Planifica el proyecto y mide sus beneficios económicos. Participa simultáneamente en varios proyectos. Apoya en la resolución de conflictos que surjan en los equipos. Analiza el desempeño de los equipos. Tienen habilidades al conducir varios equipos simultáneamente y una amplia formación y experiencia en el manejo del método científico y de herramientas estadísticas, como el muestreo, el análisis multivariante y el diseño de experimentos. Inicialmente puede tratarse de consultores externos. Es común su dedicación a tiempo completo a los proyectos. Según Mikel Harry, el creador de Seis Sigma, un master black belt debería completar una media docena de proyectos al año y ahorrar a la empresa USD 175.000. Además, considera que se necesita uno de estos profesionales por cada 100 empleados o por cada división de la empresa. El costo de formar un Master Black Belt es de como USD 30.000.
5. **El “Black Belt” o Jefe de Proyecto.**- Es el responsable directo del trabajo diario y de los resultados de un proyecto Seis Sigma. Se encarga de un solo equipo. Está familiarizado con el proceso que se intenta mejorar. Junto con el “Champion” justifica la necesidad de emprender un proyecto. Ayuda a seleccionar los miembros del equipo. Tienen una formación parecida a lo “Masters Black Belt”, pero manejan sólo un proyecto a la vez. Es común su dedicación a tiempo completo al proyecto que se está mejorando y que él dirige.
6. **Los “Green Belts” o Miembros del equipo.**- Usualmente son personas que trabajan directamente en el proceso que se está revisando. Son la fuerza y la mente encargadas de recoger los datos que después ellos mismos van a analizar. Casi nunca se dedican al proyecto a tiempo completo. Son empleados que han recibido suficiente

formación en Seis Sigma como para ser parte de los equipos, o a veces para trabajar solos en pequeños proyectos relacionados con su trabajo diario.

7. **El propietario del proceso.**- Este rol puede tardar en aparecer. Cuando la organización cambia de su enfoque basado en funciones a un enfoque basado en procesos, es factible que los empleados visualicen las cadenas de procesos “extremo a extremo”, como por ejemplo todo el sistema de ventas. Ellos se convierten en los propietarios de los procesos⁴⁹.

Como se ve, se trata de una estructura bastante compleja y cara, que para cada proyecto implica la participación de cómo siete personas al menos, dos a tiempo completo. Sólo una infraestructura de equipos así, sumada a las actitudes decididas y comprometidas de todo el personal, permitirá la creación de un nuevo tipo de organización. Deberán pasar muchos años antes de que se pueda desmontar toda la parafernalia de funciones y roles descritos. El momento sucederá cuando la organización deje de hacer Seis Sigma de forma consciente y esforzada, y empiece a hacerlo de forma automática y sin esfuerzo. Cuando lleve las herramientas y la cultura Seis Sigma en la sangre.

2.2.7. CONDICIONES PARA EL ÉXITO

Cuando se trata de implantar esta metodología en una empresa, los expertos recomiendan que se emprenda en la creación de una verdadera cultura en la que se comprometa toda la organización, polarizándose todos hacia Seis Sigma. Si es que se utilizan sólo algunas de las herramientas que conforman dicha metodología, si la aplicación es aislada y

⁴⁹ Pande, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2004). *Las claves prácticas de Seis Sigma*. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

poco consistente, o si es utilizada sólo por unas cuantas personas dentro de la organización, los intentos de mejora serán seguramente estériles⁵⁰.

De hecho, un buen resumen de las recomendaciones para no enfrentar resultados decepcionantes es el siguiente:

1.- Compromiso y Participación.- Todos, desde el gerente general hasta el más modesto de los empleados, deben estar comprometidos para generar el cambio de cultura hacia Seis Sigma. Cuando se inicia el camino hacia la mejora continua, no se puede volver atrás. Todas las prácticas tradicionales obsoletas deben ser eliminadas. El cambio hacia la cultura Seis Sigma se inicia con la capacitación de los niveles de dirección, pero esto no debe ser considerado sólo como un ejercicio formal. El papel de la dirección no es únicamente el de proveer recursos, si no el de involucrarse en la nueva cultura de trabajo.

2.- Involucrar a los Proveedores.- Seis Sigma trabaja con procesos que implican entradas y salidas. Las entradas son los materiales y servicios que entregan los proveedores, por lo que ellos deben ser tratados bajo un esquema que no afecte negativamente a las salidas de los procesos de la organización.

3.- Comunicación a todos los niveles.- Es necesario desplegar una comunicación formal y documentada de toda actividad que se realice bajo la metodología Seis Sigma. La comunicación debe llegar a todos los niveles de la organización.

4.- Responsabilidades y Autoridad.- Para aplicar correctamente las herramientas y el protocolo, el equipo Seis Sigma debe ejecutar muchas actividades orientadas a medir, analizar e implementar. Todo ello implica interactuar intensamente con el personal, la maquinaria, los equipos, departamentos y procesos. Por lo mismo, el equipo debe estar investido de la

⁵⁰ <http://www.ekosnegocios.com/revista/pdf/205.pdf>

autoridad suficiente como para que las acciones sean ejecutadas sin inconvenientes y los proyectos puedan ser concluidos.

5.- Fomentar la cultura del análisis y la documentación.- Es importante que todos los miembros de la organización adquieran la disciplina de seguir procedimientos. Seis Sigma requiere de la gran cantidad de información que se genera diariamente, y que debe ser analizada apropiadamente bajo un enfoque estadístico. La información debe ser lo suficientemente confiable como para trabajar con muestras representativas que permitan realizar inferencias correctas respecto del comportamiento de la población, ahorrando tiempo y dinero⁵¹. En este aspecto, se ha encontrado que la orientación documental de las Normas ISO 9000 suelen fortalecer la disponibilidad de información y datos que demanda la metodología Seis Sigma.

2.3. EL ENFOQUE AL CLIENTE

Uno de los conceptos que sustentan la metodología Seis Sigma es el **enfoque hacia las necesidades del cliente, externo o interno**. En adelante, este trabajo se referirá siempre al cliente externo, al que recibe los bienes o servicios de la empresa, pero debe tenerse presente que conceptos similares deben aplicarse al cliente interno.

2.3.1. LAS CTQ Y VOC

Según la American Society for Quality (ASQ), la calidad “es el conjunto de características de un producto o servicio que le confieren su aptitud para satisfacer las necesidades explícitas o implícitas de los clientes”; y las Normas ISO-9000:2005 definen la calidad como “el grado en el que un conjunto de características inherentes del bien o servicio cumplen con los requisitos (de los clientes)”. Así que, ante todo, la calidad está determinada por lo que satisface al cliente, y la

⁵¹ <http://www.ekosnegocios.com/revista/pdf/205.pdf>

satisfacción de éste normalmente tiene que ver con el cumplimiento de sus expectativas. Se dice que hay satisfacción cuando el cliente percibe que el producto o servicio cumple al menos con lo que él esperaba. Cualquier valor inferior al estándar de satisfacción del cliente debería ser considerado como defecto en el bien o en el servicio⁵².

De hecho, las principales variables de entrada a un proceso son conocidas como “Críticas para la Calidad” (CTQ: Critical to Quality) y muchas de ellas provienen de preguntarle al cliente qué es lo que necesita, qué es importante para él. La respuesta, que guía las acciones de la metodología Seis Sigma, se conoce como la “Voz del cliente” (VOC: Voice of Clint). Seis Sigma se enfoca en las expectativas de los clientes y sus correspondientes factores CTQ. El resultado es la necesidad de que la organización alinee sus objetivos con los requisitos y expectativas de sus clientes. Cabe indicar que existen otros dos tipos de variables que pueden servir de input de los procesos que se mejoran. Estas son las CTT: Critical to Time; y las CTC: Critical to Cost. Las primeras son determinantes cuando se quiere bajar el tiempo de respuesta, y las segundas cuando se quiere bajar los precios de los bienes o servicios⁵³. En todo caso, todas las variables críticas se enfocan en satisfacer al cliente.

El concepto CTQ en Seis Sigma le permite a la empresa mejorar la calidad, pero trabajando desde la perspectiva del cliente.

Para cada producto o servicio deben determinarse las expectativas de los clientes, y respecto de ellas definir los factores críticos (especificaciones o requisitos) CTQ. Para cada producto o servicio pueden existir docenas o incluso cientos de aspectos que considerar. Lo importante es centrarse en los más importantes para el cliente. Y para cada aspecto clave pueden existir muchas expectativas. Hay que determinar las esenciales, hacia ellas dirigir la mejora de los procesos implicados y finalmente medir si es que el bien o servicio alcanza a cumplir con esas expectativas. Identificar los factores CTQ suele ser un proceso arduo y

⁵² Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

⁵³ http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:zNuPb293Q5sJ:www.icicm.com/files/FASE_DEFINICION_BB.doc+&cd=5&hl=es&ct=clnk&gl=ec

trabajado. En cierta compañía, el equipo Seis Sigma analizó entre 800 y 1.000 procesos, cada uno de los cuales tenía entre 100 y 120 especificaciones diferentes, y de entre todo ese montón de información logró identificar los factores CTQ indispensables para la satisfacción de los clientes potenciales y actuales de la empresa. Estos factores CTQ serían las entradas de los procesos a mejorar en los futuros proyectos Seis Sigma⁵⁴. Existen técnicas que facilitan el hallazgo de los factores CTQ (como el “árbol CTQ”), que pueden ser consultadas con facilidad.

2.3.2. VALOR AGREGADO

Por supuesto, cualquier tarea, actividad o proceso que ayude a cumplirle al cliente en sus expectativas es parte de las tareas, actividades o procesos por los que el cliente está dispuesto a pagar, y por lo mismo, puede afirmarse que ellos **agregan valor** al producto o servicio. En el otro extremo, cualquier tarea, actividad o proceso por las cuales el cliente no está dispuesto a pagar (movimientos inútiles en una bodega, decisiones equivocadas de los directivos, paros de maquinaria no sujeta a mantenimiento preventivo) **no agregan valor**, sólo añaden costos, y deberían ser objeto de eliminación.

Puede ser que una empresa deba cumplir con normas de producción o servicio que le son impuestas por autoridades de control, o con requerimientos de la gerencia, pero básicamente los estándares, requisitos o especificaciones deben ser definidos por el cliente, no por la organización. Él es el que paga y sabe lo que quiere; y como ahora existe mucha información disponible y bastantes productores de bienes y servicios compitiendo entre ellos al ofrecer opciones similares, hay que dar por seguro que el cliente va a ser muy exigente en sus requerimientos. La organización debe comprender que no debe invertir tiempo, esfuerzo y recursos en mejoras que no le interesan al cliente, que no agregan valor desde su punto de vista, mientras que puede estar dejando de trabajar en aspectos que sí son CTQ para el cumplimiento de sus expectativas.

⁵⁴ Brue, G. (2003). *Seis Sigma para Directivos*. Madrid; McGraw-Hill.

2.3.3. SEIS SIGMA EN EL DISEÑO DE NUEVOS PRODUCTOS

La voz del cliente debería ser un factor que oriente no solamente la mejora de procesos, productos y servicios ya existentes, sino que también debería ser decisiva cuando se diseñan productos o servicios nuevos. Se estima que sólo el 60% de nuevos productos lanzados al mercado son realmente un éxito. Por cada siete ideas de nuevos productos, sólo cuatro pasan a desarrollo y finalmente sólo una triunfa.⁵⁵ Eso significa que, en general, el ciclo de desarrollo de nuevos productos trabaja a un nivel aproximadamente **4 σ** . De hecho, hay empresas que tienen un nivel **6 σ** en sus áreas funcionales, pero trabajan a un nivel mucho menor cuando desarrollan nuevos productos o servicios.

Los ejemplos de productos que fracasaron en el mercado abundan, tratándose inclusive de exitosas empresas transnacionales. Las pérdidas financieras, y hasta de imagen, fueron frecuentemente el alto precio a pagar por la equivocación. Tal vez no preguntaron bien lo que el cliente quería, y los diseñadores se empeñaron en imponer lo que ellos pensaban que era bueno para todos. Algunos ejemplos:

- Ahora se considera que el sistema operativo Windows 8 lanzado por Microsoft en 2012 ha resultado un producto muy poco exitoso. Por esta razón, Microsoft se ha apresurado por sacar al mercado una nueva versión llamada Blue, que está reemplazando al poco afortunado Windows 8.
- En 1985, la Coca-Cola intentó introducir en el mercado una nueva versión del famoso refresco, elaborado en base a una nueva receta. La prueba se llamaba New Coke y no duró ni tres meses en el mercado.

⁵⁵ Cooper, R. (2001). *Winning at new products: accelerating the process from idea to launch*. New York; Perseus Book.

- En 2006 Microsoft quiso lanzar su propia alternativa al Ipod de Apple: el Microsoft Zune. El intento fue un auténtico desastre, y luego de una oscura presencia de cinco años en el mercado, la producción de este reproductor del formato de audio MP3 se paró por completo.
- En 2004, BIC lanzó al mercado unas tangas desechables, de un solo uso, y unos perfumes de bajo costo marca BIC. Hoy en día estos diseños constan entre los peores errores jamás cometidos en el ámbito del mercadeo.
- McDonald's ha fracasado frecuentemente al intentar lanzar nuevos productos. McLangosta, McSpaghetti y McPizza son algunos de ellos. Por un lado, los consumidores se sentían incómodos al comer langosta o spaghetti en un local de comida rápida. Por otro, pensaban en que para comer pizza hay que una pizzería.

Y la lista es interminable. Agua embotellada para mascotas, Applemaps, platos precocinados Colgate, Yogur Cosmopolitan (de las revistas), donas con cebollas y con sabor a lima-limón, autos Mercedes de tamaño económico...

Hay que ser enfáticos en que ésta es una de las caras de la medalla. No preguntarle al cliente es malo, pero parecería que también es malo preguntarle demasiado, o preguntarle mal. De hecho, existen numerosas publicaciones donde se previene al empresario sobre este problema. El incorporar a un producto o servicio todas las sugerencias posibles, sin detectar realmente las expectativas CTQ de la generalidad de los clientes puede llevar a la empresa a

callejones, sin otra salida posible que el fracaso⁵⁶. Hay quienes reconocen que hay mucha distancia entre lo que los clientes dicen que quieren y lo que finalmente compran en el mercado. Además, dicen, es imposible pedir a los clientes que imaginen todas las posibles alternativas de especificaciones para un nuevo producto, sin comprometer seriamente la practicidad del mismo (Ver Figura 10). Llegan al extremo de citar la famosa frase de Henry Ford: "Si yo hubiera consultado a la gente respecto de lo que ellos querían del futuro del transporte, hubieran respondido que sólo necesitaban caballos más veloces"⁵⁷.



FUNCIONALIDADES SOLICITADAS POR HOMERO:

- Sujeta bebidas para vasos gigantes
- Bola al final de la antena
- Grandes zumbaburros
- Bocina que toque "la cucaracha"
- Jaula para mascota en el capó
- Cúpula insinorizada para los niños
- Gradas a los lados

Figura 10: ¿Expectativas CTQ de los clientes?

Fuente: <http://javiermegias.com/blog/2012/03/debes-buscar-clientes-para-tu-producto-o-productos-para-tu-cliente/>

Los errores contra los que se debe estar prevenido al hablar con el cliente suelen ser: formatos mal elaborados, muestreo defectuoso, preguntas confusas, preguntas inadecuadas, empleados sin experiencia que entrevistan al cliente y no le pueden realimentar, preguntas en exceso (no deberían pasar de 30), métodos inadecuados de análisis, tratar de cuantificar las percepciones subjetivas del cliente, entre otros. Existen numerosas fuentes que agotan exhaustivamente el tema referido a la investigación en el mercado de la Voz del Cliente.

⁵⁶ <http://javiermegias.com/blog/2012/03/debes-buscar-clientes-para-tu-producto-o-productos-para-tu-cliente/>

⁵⁷ <http://emprendedorasenred.com.ar/862-c%C3%B3mo-determinar-lo-que-el-cliente-quiere>

En lo que a Seis Sigma corresponde, la orientación al cliente es su máxima prioridad. La medición del rendimiento de un proceso y del valor que añade empieza y termina con la voz del cliente, y la mejora continua se evalúa por el impacto que tal mejora tiene en su satisfacción.

2.3.4. EL MODELO KANO

Clasifica los factores que aparecen a partir de la identificación de las expectativas del cliente en tres categorías: Satisfactores, Insatisfactores y Deleitadores (Ver Figura 11). Los factores CTQ están incluidos en las categorías de los Satisfactores y los Deleitadores.

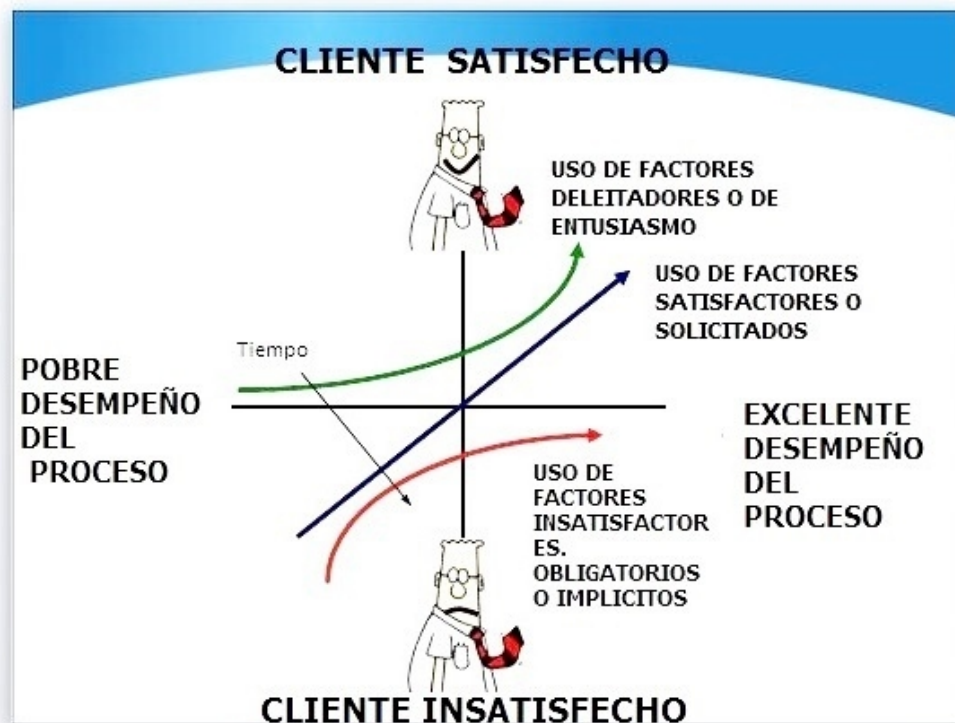


Figura 11: Modelo Kano.- Factores de satisfacción del cliente

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

Como puede verse en la Figura 11, normalmente se puede esperar que los procesos evolucionen desde un desempeño bajo a un desempeño alto, pero eso no significa que el cliente vaya a estar satisfecho en todos los casos. Si el proceso mejora, pero sólo utilizando entre sus entradas los factores obligatorios, los implícitos, los “commodities” (con bajo nivel de

valor, especialización y diferenciación), entonces el cliente siempre estará insatisfecho y se sentirá frustrado al utilizar el bien o servicio.

Es totalmente diferente si los criterios de mejora se basan en factores deleitadores, que van más allá de las expectativas del cliente. El uso de factores solicitados, de criterios basados en lo mínimo que esperaría al cliente, causa que éste satisfecho, pero nunca entusiasmado.

Otro aspecto interesante que expone este modelo es que, con el tiempo, los factores deleitadores pasan a ser obligatorios en todos los productos o servicios del mismo tipo presentes en el mercado. Lo que han hecho las empresas exitosas es simplemente adoptarlos antes de que las otras empresas, menos ágiles, los incorporen en su gestión.

Se han desarrollado técnicas que permiten identificar los factores CTQ satisfactores y deleitadores, mismos que son entradas valiosas para la mejora de procesos implicados en la producción de bienes o servicios existentes, o para los procesos de bienes y servicios nuevos que se diseñan. No debe olvidarse que Seis Sigma se centra en el proceso como el elemento clave para poder cumplir con los requisitos y expectativas de los clientes⁵⁸.

Como ayuda para determinar los factores CTQ se aconseja utilizar y analizar los siguientes criterios:

- Las metas del negocio
- Entrevistas cara a cara
- Encuestas
- Reportes de quejas de los clientes
- Análisis de devoluciones
- Análisis de fuentes de insatisfacción
- Análisis de fuentes de satisfacción
- Discusiones ejecutivas

⁵⁸ Pande, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2004). Las claves prácticas de Seis Sigma. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

- Tendencias futuras del mercado

Y las siguientes herramientas:

- Análisis de la Voz del Cliente
- Medidas de desempeño y factores críticos de la calidad
- Selección de proyectos DMAIC
- QFD. Despliegue de la función de la calidad
- Balanced Score Card
- Análisis Financiero
- Benchmarking interno y externo
- Pareto
- Tiempos de Ciclo
- Preguntar hasta agotar
- DAF.- Detección analítica de fallas
- Árbol CTQ

2.4. SEIS SIGMA Y EL MÉTODO CIENTÍFICO

Existen tres puntos básicos que explican el enorme éxito de la Metodología Seis Sigma: la utilización del Método Científico, el concepto de disminución de la Variabilidad de los Procesos (que equivale a hacerlos más robusto), y la medición y análisis correctos de variables cuantificables (hechos, no suposiciones) referidas a productos, servicios, procesos, actividades y tareas. A procesos, sobre todo.

2.4.1. EL MÉTODO CIENTÍFICO Y EL PROTOCOLO DMAIC

Hace más de 100 años, Lord Kelvin, físico y matemático inglés, creador de la escala de temperatura que lleva su nombre y del concepto del cero absoluto, escribió lo siguiente: *“Cuando puedes medir aquello sobre lo que estás hablando, y lo puedes expresar en números, tú conoces algo acerca del tema; pero cuando tú no puedes medirlo, y cuando no puedes expresarlo en números, tu conocimiento es exiguo e insatisfactorio. Esto puede significar un atisbo de conocimiento, pero difícilmente podrá decirse que has avanzado en el campo de la ciencia”*⁵⁹. Precisamente lo que persigue Seis Sigma por medio de su métrica es expresar como cantidades medibles y confirmables, estadísticamente válidas, las variables de entrada, las variables de salida y toda condición interna que afecte a la interacción de las actividades que ocurren dentro de los procesos. Es decir, persigue conocer realmente los procesos.

En general, se reconoce que el Método Científico comprende cuatro fases: Observación, Formulación de Hipótesis, Experimentación y Emisión de Conclusiones, respecto de si se mantiene o no el modelo propuesto (Ver Figura 12). La metodología Seis Sigma ha desarrollado un protocolo, un camino a seguir, que se conoce como ciclo **DMAIC** y es obligatorio durante la ejecución de todo proyecto que implique la mejora y control de procesos (Ver Figura 13).

Se ha relacionado el ciclo **DMAIC** con el ciclo **PHVA** de Deming, y hay quienes le han añadido dos fases adicionales, que son Reconocer al principio y Comunicar al final, transformándolo en **RDMAICC**, pero básicamente el protocolo ha permanecido en su forma original. Probablemente la comparación más razonable que se le ha hecho es respecto del método científico.

⁵⁹ <http://web.Cortlan.edu/matresearch/SeisSigma.pdf>

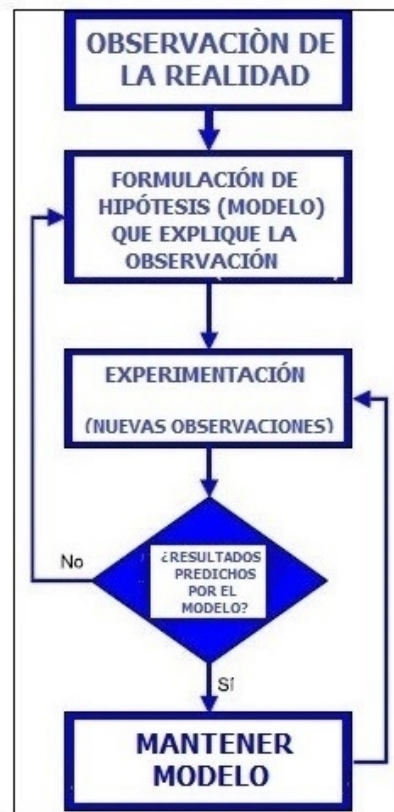


Figura 12: Fases del método científico
Elaborado por: Bolívar Córdor

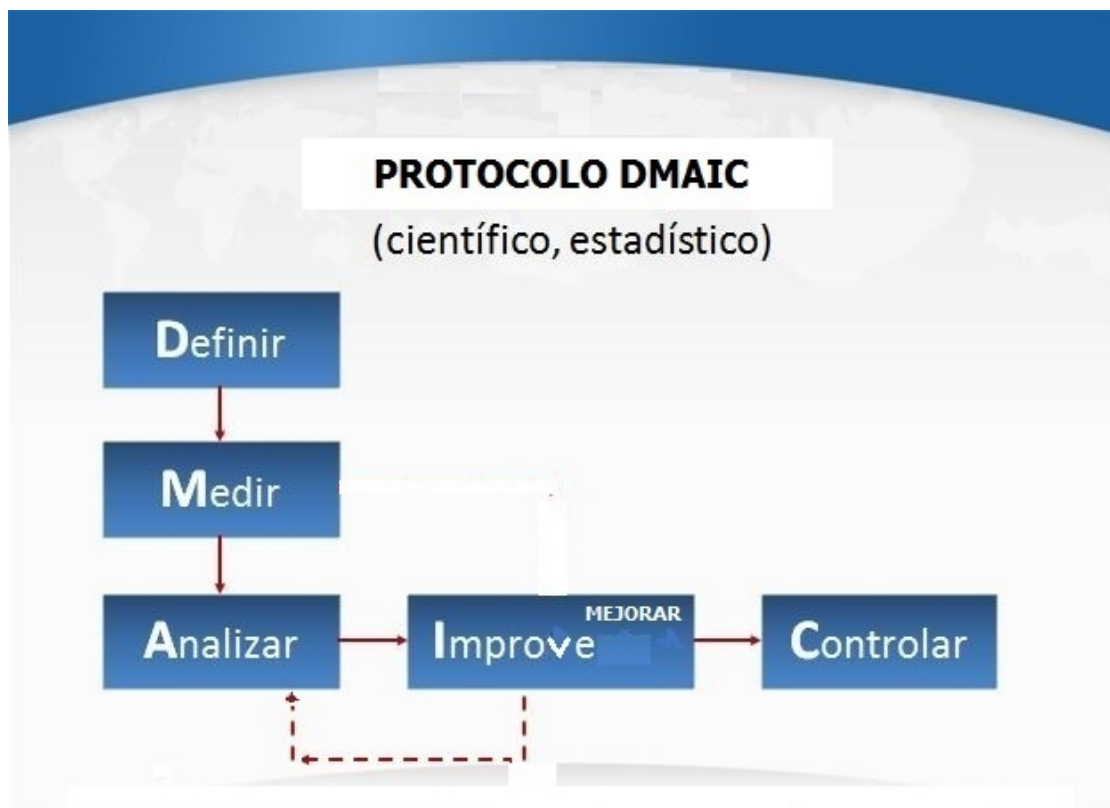


Figura 13: Protocolo DMAIC

Fuente: Certificación Six Sigma Green Belt, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

Las fases **D**efinir y **M**edir del DMAIC corresponden a la fase “observación de la realidad” del método científico. En la fase **A**nalizar se plantean las “hipótesis” que explican lo observado; en definitiva, se propone un modelo $Y = f(X_i)$, donde Y es la salida del proceso y las X_i son las entradas del mismo. En la fase **M**ejorar se “experimentan” soluciones que “ponen a prueba” el modelo estadístico propuesto; éste se verifica y valida en su efectividad para **M**ejorar el proceso. Si no hay éxito en el desempeño del modelo propuesto, se regresa a la fase **A**nalizar. Si las mejoras y las predicciones del modelo son exitosas, “el modelo se mantiene” y se **C**ontrola para su adecuada aplicación permanente en el tiempo, de manera que el proceso se ejecute con un mínimo de variabilidad. En definitiva, el protocolo Seis Sigma cumple con los lineamientos del Método Científico.

La alternativa a este protocolo basado en el método científico es el método empírico, el basado en la experiencia, en la prueba y el error. El método empírico puede predecir resultados, pero no sabe por qué ellos ocurren. No plantea hipótesis ni modelos. Un ejemplo de paso del método empírico al método científico es la evolución de la Alquimia a la Química.

La cultura tradicional de las organizaciones se basa en el uso del método empírico. Sobre todo en la manufactura, la prueba y el error para detectar los defectos que se generan en los procesos es la manera usual de trabajar en este tipo de cultura. El resultado es que en pocas ocasiones los intentos de mejora conducen a resultados notables. En la mayoría de casos se termina en costosos fracasos.

2.4.2. LAS HERRAMIENTAS QUE USA SEIS SIGMA

En realidad, Seis Sigma no ha inventado ninguna de las herramientas que utiliza. Por ejemplo, el Diseño de Experimentos fue inventado por Sir Ronald Fisher, un gran matemático inglés apasionado por la genética, a principios del siglo 20. En realidad, el Diseño de Experimentos, nació en el área de la agricultura, pero después se convirtió en una herramienta

invaluable para quienes realizan experimentos en todo el mundo, y ahora Seis Sigma lo ha llegado a convertir en la principal herramienta de su metodología.

Las herramientas estadísticas y administrativas ya existían. Seis Sigma emplea entre 60 y 70 de ellas. Definir cuáles y en qué medida utilizar depende del experto y de la naturaleza del proceso que se intenta mejorar. No todas deben usarse obligatoriamente. La administración de empresas, la ingeniería industrial, la administración de operaciones, y su búsqueda permanente de la calidad integral de las organizaciones fueron inventando herramientas, o adaptándolas desde otras disciplinas, a lo largo de varios decenios. Seis Sigma las integró y hoy las utiliza bajo una óptica estrictamente científica, básicamente estadística.

Las herramientas que se utilizan en cada proyecto Seis Sigma dependen de la complejidad y de las características particulares del mismo. Dependen de las habilidades y conocimientos de los profesionales que dirigen y ejecutan el proyecto, y del grado de sofisticación con el que se desea analizar y mejorar los procesos implicados. La herramienta más avanzada de las utilizadas por Seis Sigma es el Diseño de Experimentos, y lo adecuado sería que siempre que sea posible se la llegara a utilizar en la mejora de procesos. Sin embargo, se han desarrollado proyectos exitosos prescindiendo de esta valiosa herramienta.

En la Tabla 6 se pueden ver varias de las herramientas utilizadas por Seis Sigma, así como la etapa del ciclo DMAIC en que es aconsejable su aplicación. Se trata de herramientas que deben ser bien conocidas por el Black Belt y por el Master Black Belt encargados de un proyecto. A lo largo del presente trabajo, las herramientas se mencionan y, en algún caso de particular interés se describen, pero se asume que quien está interesado en el tema tiene bases de conocimiento y que puede profundizar en las abundantes fuentes que existen, si es necesario. En primera instancia, es preciso que se conozca para qué sirve cada una de las herramientas, aunque no se tenga un dominio experto de cada una de ellas.

Tabla 6:
Herramientas administrativas aplicadas a las fases DMAIC

DEFINIR	MEDIR	ANALIZAR	MEJORAR	CONTROLAR	
<ul style="list-style-type: none">•Balanced Scorecard•KPI's•TPM•VOC•Benchmark•Priorización de Proyectos•Pareto de Proyectos	<ul style="list-style-type: none">•QFD•Pareto de KPI's•5W-2H•SIPOC•VSA•Diagrama de Flujo•Project Charter	<ul style="list-style-type: none">•R&R•Muestreo•Nivel de Sigma•COPQ•Análisis Estadístico•Gráficas de Control	<ul style="list-style-type: none">•Ishikawa•Los 5 Porqué•Matriz Causa - Efecto•Los 8 Desperdicios•Diagrama Spaghetti•Análisis de Valor•Análisis Estadístico•Correlación y Regresión•Pruebas de Hipótesis•ANOVA•DDE•Simulación•SMED•Gráficos Pareto•AMEF	<ul style="list-style-type: none">•Poka Yoke•5 S's•Células de Trabajo•VSA•SMED•Kanban•Kaizen•Capacitación•Plan de Acción	<ul style="list-style-type: none">•Gráficos de Control•Gráficos de Caja•Planes de Control•Planes de Calidad•Capacitación•Estandarización•Nivel de Sigma•COPQ

Notas:

KPI.- Key Process Indicator
 TPM.- Total Productive Maintenance
 VOC.- Voice of Client
 5W.- 5 Por qué: Quién, Cuándo, Por qué, Qué, Dónde
 2H.- How, How Much: Cómo, Cuánto
 SIPOC.- Supplier Input Process Output Customer
 VSA.- Variation Analysis
 COPQ.- Cost of Poor Quality
 SMED.- Single Minute Exchange of Die

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

En el ANEXO 1 puede verse otra tabla de las herramientas utilizadas por Seis Sigma procedente de otra fuente. Aparecen algunas nuevas, otras no están. Ello es un indicio de la flexibilidad de esta metodología en cuanto a los recursos a los que puede recurrir en su búsqueda de la eliminación de la variabilidad de los procesos. Cada experto enfatiza las herramientas que mejor maneja, y si alguna nueva herramienta administrativa o estadística aparece, pasa a ser probada por Seis Sigma para comprobar su utilidad. De hecho, una de las

instituciones que están detrás de estas investigaciones de mejora de la metodología Seis Sigma es el SSRI (Six Sigma Research Institute) fundado por Motorola en 1.990.

2.5. DESARROLLO DE PROYECTOS SEIS SIGMA

Ya se mencionó que el camino seguido por la metodología Seis Sigma para mejorar sistemáticamente los procesos de una empresa se conoce como ciclo o protocolo DMAIC. Son las iniciales de las fases Definir, Medir, Analizar, Improve (mejorar) y Controlar. A veces se le añaden dos fases adicionales, que son Reconocer al principio del ciclo y Comunicar al final, pero en general son las cinco fases mencionadas primeramente las que se reconocen en la mayoría de textos.

Empezando por “Definir” qué hacer, lo adecuado es que Seis Sigma desarrolle sus proyectos basada en los objetivos delimitados por el Balanced Scorecard, dentro de cada una de sus perspectivas. Un ejemplo de los objetivos que puede plantear el BSC (algunos de los cuales pueden ser alcanzados por medio de la mejora de procesos que ejecuta Seis Sigma) se ve en la Tabla 7. Se debe recordar que las perspectivas desde las cuales el BSC plantea objetivos estratégicos son: Cliente, Financiera, de Procesos Internos, y de Habilidades y Crecimiento del recurso humano.

El que Seis Sigma procure extraer proyectos desde los objetivos propuestos en el BSC garantiza que el trabajo se alinee en todos los frentes, hacia los objetivos estratégicos establecidos a corto y largo plazo por los niveles de dirección de la organización. Es el escenario ideal, pero no siempre las empresas basan sus acciones y proyectos en un BSC, de manera que se deben definir proyectos siguiendo otros procedimientos.

Tabla 7:**Objetivos del BSC alcanzables mediante mejora de procesos****Financiero**

- Niveles de inventario
- Vueltas de inventario
- Costo por unidad
- Productividad, por unidad
- Costos
- Retornos de inversión
- Ahorros por proyectos

Procesos Internos del Negocio

- Defectos, PPM's, Nivel de Sigma
- Disponibilidad
- Eficiencia
- Calidad a la primera
- Calidad de los proveedores
- Utilización
- Volumen
- Retrabajos
- Desperdicios

Cliente

- Satisfacción del cliente
- Quejas y devoluciones
- Entrega a tiempo en cantidad
- Entrega a tiempo en fecha
- Calidad del producto o servicio final
- Comunicaciones

Habilidades y Crecimiento

- Utilización de herramientas SS
- Aprovechamiento de la capacitación
- Juntas efectivas
- Tiempo extra por millar
- Personas capacitadas en Six Sigma
- Avance de proyectos, programas
- Proyectos exitosos terminados
- Cambio de cultura
- Ausentismo, rotación, accidentes

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

Otro aspecto que se debe recalcar se refiere a que normalmente los procesos que busca mejorar Seis Sigma son los que en el Mapa de Procesos se definen como operativos y de soporte. Esto es así porque de estos dos tipos de procesos se pueden extraer datos cuantitativos susceptibles de someterse a análisis estadístico. No es tan fácil hacerlo de los procesos estratégicos.

La primera fase, la de Definir, es la que se encarga de seleccionar los proyectos que deben desarrollarse. Podría decirse que es la fase más importante, pues garantiza que se inviertan recursos en trabajos que van a incrementar el agregado de valor de los procesos. Por eso mismo, deben ser aprobados por la dirección de la empresa, lo que requiere de la presentación de argumentos muy bien sustentados. Las otras fases implican la aplicación técnica de las herramientas administrativas y estadísticas, por lo que el desarrollo de las mismas tiene características más bien operativas, como se podrá ver en los casos de aplicación del protocolo DMAIC a procesos en una empresa real.

2.5.1. SELECCIÓN DE LOS PROYECTOS SEIS SIGMA

De la selección se encarga la primera fase del ciclo DMAIC, es decir las fase DEFINIR. Quiere decir definir los proyectos de mejora de procesos a los que se debe aplicar la metodología Seis Sigma, porque serán los que reporten los mayores beneficios al cliente, a las partes interesadas o a la organización. En la selección y aprobación de los proyectos a emprender debe evidenciarse una presencia constante de la dirección de la empresa, incluso para contar a futuro con su apoyo incondicional.

Si existe un BSC en la empresa, la selección de proyectos se hace más simple, pues el análisis sobre lo que es más conveniente para la organización ya se hizo y se lo materializó en una estrategia, abriendo en las diferentes perspectivas los objetivos correspondientes a perseguir, definiéndolos incluso con indicadores bien claros.

De no existir el BSC, se debe seleccionar los proyectos que pueden culminar con éxito por medio de la aplicación de criterios orientadores, mismos que varían tan ampliamente como los autores que los proponen. Se han mencionado algunos como “Esfuerzo Necesario” vs. “Probabilidad de Éxito”, o “Costos Incurridos” vs. “Beneficios Obtenidos”⁶⁰. Un conjunto de criterios que tiene precedentes de obtener buenos resultados en la práctica se los puede ver en la Figura 14.

Según el procedimiento presentado en la Figura 14, se definen tres criterios a la hora de seleccionar los proyectos Seis Sigma: “Aplicabilidad”, “Impacto” y “Medición Financiera”. En el ANEXO 2 se puede ver una hoja de trabajo en Excel similar a la utilizada para cuantificar los tres criterios que inciden en cada uno de los posibles proyectos presentados en el ejemplo de la Figura 14.

⁶⁰ Brue, G. (2003). *Seis Sigma para Directivos*. Madrid; McGraw-Hill.

En el ejemplo propuesto, los mejores proyectos están representados por los globos más grandes y alejados del origen. En este caso, se debería empezar con el proyecto llamado “Disminución del Proceso de Contratación”.

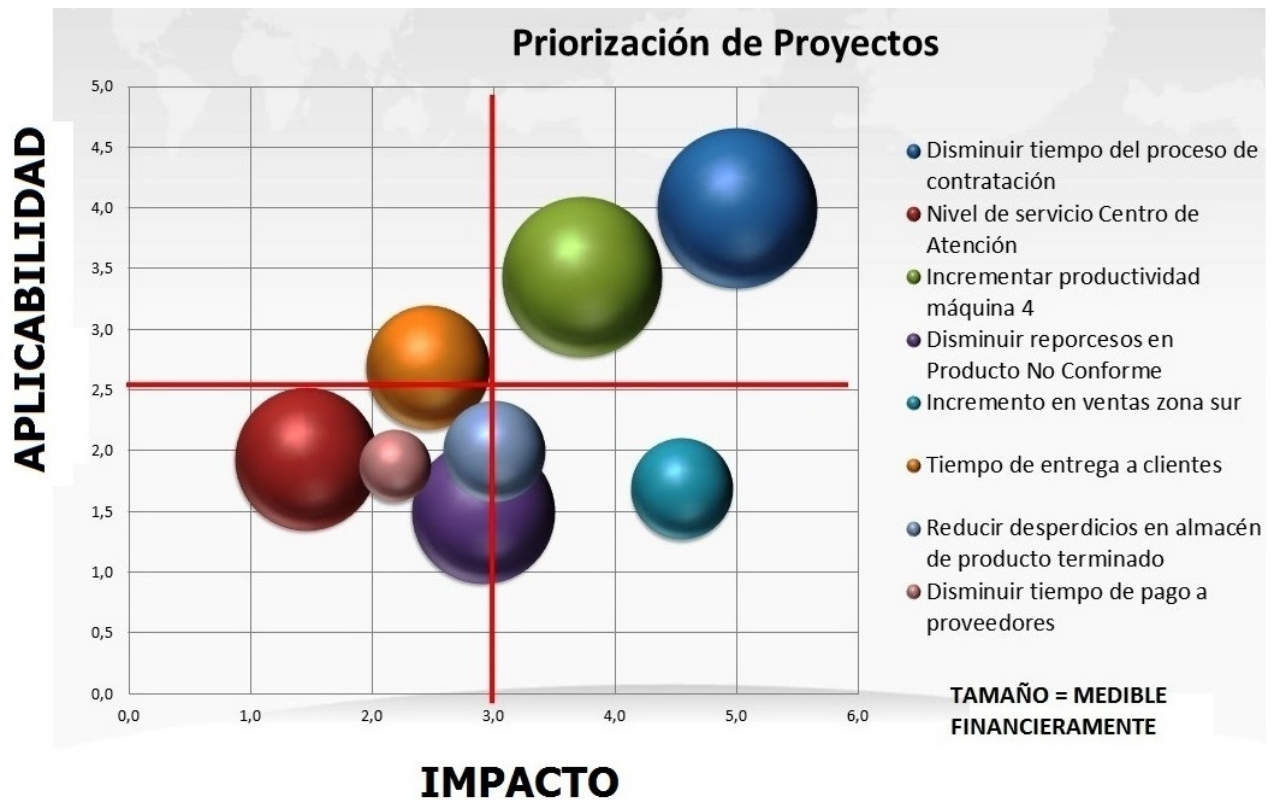


Figura 14: Selección de proyectos Seis Sigma

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA BLACK BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

Los proyectos representados por globos que están muy cerca del origen, o que son de un tamaño circular muy pequeño deberían realizarse al último, o simplemente no ejecutarse.

2.5.2. DIAGRAMA SIPOC

Según la información contenida en la Tabla 6 y en ANEXO1, las herramientas que se pueden emplear en la primera fase del protocolo DMAIC, dedicada a la selección de proyectos, son de variada índole, llegando incluso a mencionarse las Redes Pert. Pero hay cuatro herramientas que se deben enfatizar por su importancia en la orientación de las decisiones que se van a tomar: las Voz del Cliente (VOC), la determinación de las variables de entrada Críticas

para la Calidad (CTQ), el Diagrama SIPOC y el Análisis QFD. Sobre los dos primeros conceptos se disertó en el apartado referido al Enfoque al Cliente.

SIPOC son las iniciales de **Suppliers - Inputs - Process - Outputs - Clients**, y es un diagrama que resume los tres elementos básicos de un proceso: las entradas (asociadas básicamente a los proveedores de información o materiales físicos necesarios para el proceso), el proceso propiamente dicho (en el que ocurre la transformación de las entradas en salidas), y las salidas que van directamente al cliente.

En la Figura 15 se puede ver el diagrama correspondiente al proceso de fabricación de un producto que es entregado a un cliente externo (se le factura), pero igual podría referirse a un proceso cuya salida va a un cliente interno, formando parte de una cadena de suministro interna.

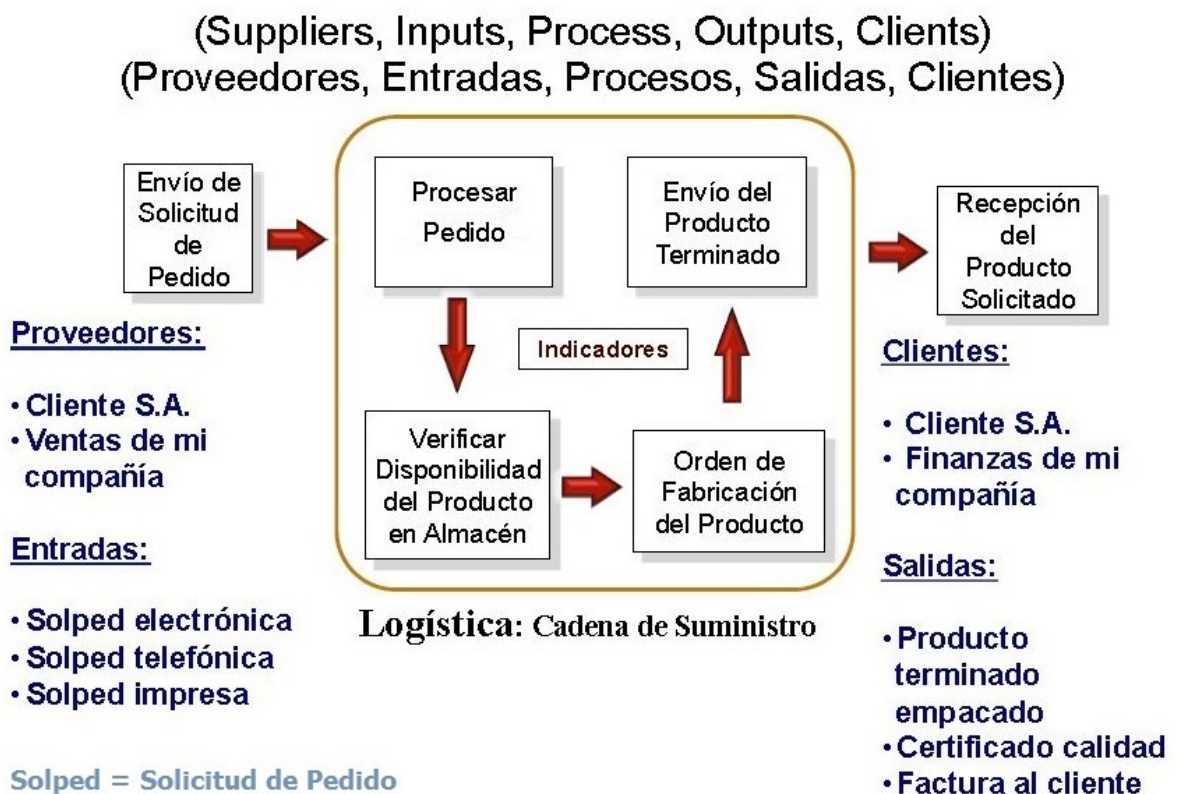


Figura 15: Diagrama SIPOC

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA BLACK BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

Las definiciones de los elementos participantes en el Diagrama SIPOC son las siguientes:

PROVEEDORES.- Son aquellos entes físicos que proporcionan las entradas necesarias para la operación del proceso. Proveedores de insumos, la misma empresa entregándose información a sí misma, y hasta el cliente que recibe el producto de salida, con su pedido y su voz, pertenecen a este grupo de elementos.

ENTRADAS.- Aquí están los formatos, solicitudes, materiales físicos, documentos, información, requerimientos, etc. que ingresan al proceso para que opere y realice la transformación.

PROCESO.- Conjunto de actividades que ejecutan la transformación de entradas a salidas. Debe describirse en un máximo de ocho pasos. Es necesario que consten las actividades principales con sus correspondientes indicadores clave (KPI). No hace falta un flujograma con detalles de decisiones, lazos, opciones, etc.

SALIDAS.- Son los “entregables” resultantes del proceso de transformación. Pueden ser productos (bienes o servicios), documentos, reportes, servicios, análisis, resultados, etc. Las salidas responden a las necesidades y voz del cliente interno o externo.

CLIENTE.- Son los entes físicos que reciben la salida o resultado del proceso. Pueden ser clientes internos o externos.

Un Diagrama SIPOC debe ser preciso en cuanto a los límites del proceso dibujado: dónde empieza y dónde termina, por lo que en su construcción debe involucrar a las personas que conocen en detalle el proceso, o son dueños del mismo. Debe también ser un mapa de alto nivel, que no entra si no en el detalle suficiente como para que el equipo Seis Sigma pueda “adivinar en primera instancia” las causas de un problema declarado respecto de ese proceso.

Un flujograma de detalle se maneja en la etapa “Analizar”, pero debe estar siempre a la mano durante el análisis del Diagrama SIPOC, para alertar respecto de indicadores de puntos calientes como son: Actividades que vuelven hacia atrás, Puntos del proceso que topan directamente al cliente, largos Tiempos de ciclo del proceso y sus sub-procesos, y Actividades que no agregan valor desde la perspectiva del cliente interno o externo ⁶¹.

2.5.3. FUNCIÓN DE DESPLIEGUE DE LA CALIDAD - ANÁLISIS QFD

Esta herramienta, Quality Function Deployment, sirve para traducir la voz (necesidades y deseos) del cliente en especificaciones (requisitos de diseño) que terminan siendo elementos de entrada.

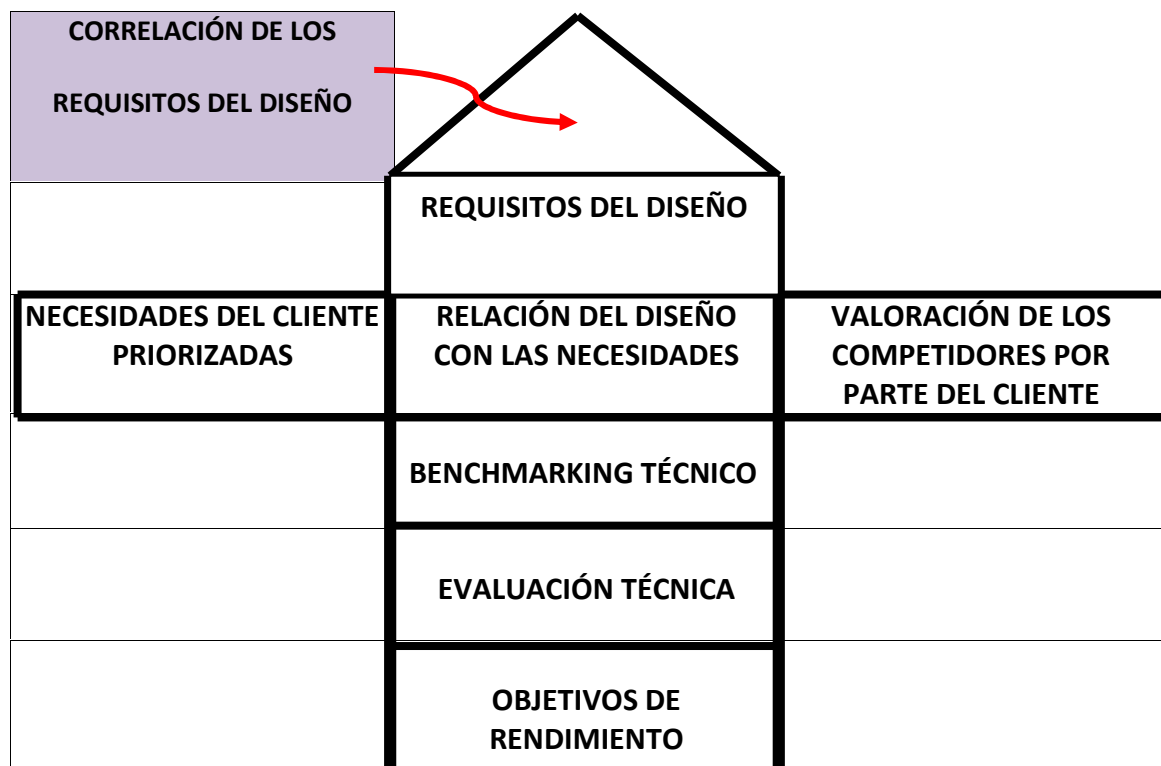


Figura 16: Despliegue de la función de la calidad - QFD

Fuente: Pande, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2004). Las claves prácticas de Seis Sigma. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

⁶¹ Pande, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2004). Las claves prácticas de Seis Sigma. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

Nació, como muchas herramientas en Japón, en la Mitsubishi Heavy Industries, y ahora la usan empresas como la Toyota, la Honda y prácticamente todas las automotrices de los Estados Unidos.

Como se ve en la Figura 16, este análisis llamado también Casa de la Calidad, permite relacionar los QUÉ del cliente, sus requerimientos, con los CÓMO satisfacerlos, que son responsabilidad de la empresa.

El ciclo QFD consta de cuatro fases:

1. Traducir las entradas provenientes de los clientes y de los competidores en características del producto o servicio.
2. Traducir las características del producto o servicio en especificaciones y medidas del mismo.
3. Traducir las especificaciones y medidas del producto o servicio en características del diseño del proceso.
4. Traducir las características del diseño del proceso en especificaciones y medidas de su rendimiento.

La Casa de la Calidad sirve para mejorar procesos existentes, pero también y tal vez sobre todo, para el diseño de nuevos productos o servicios. Es lo que se ve en la Figura 17, donde se ha efectuado el despliegue de la función de calidad para el diseño de una nueva aspiradora doméstica.

En definitiva, el QFD sirve, en primer lugar, para identificar las necesidades y expectativas de los clientes y para priorizar esas expectativas en función de su importancia. Y, por otro lado, ayuda a focalizar los recursos humanos y materiales en la satisfacción de dichas necesidades y expectativas.⁶²

⁶²<http://web.cortland.edu/matresearch/QFD.pdf>

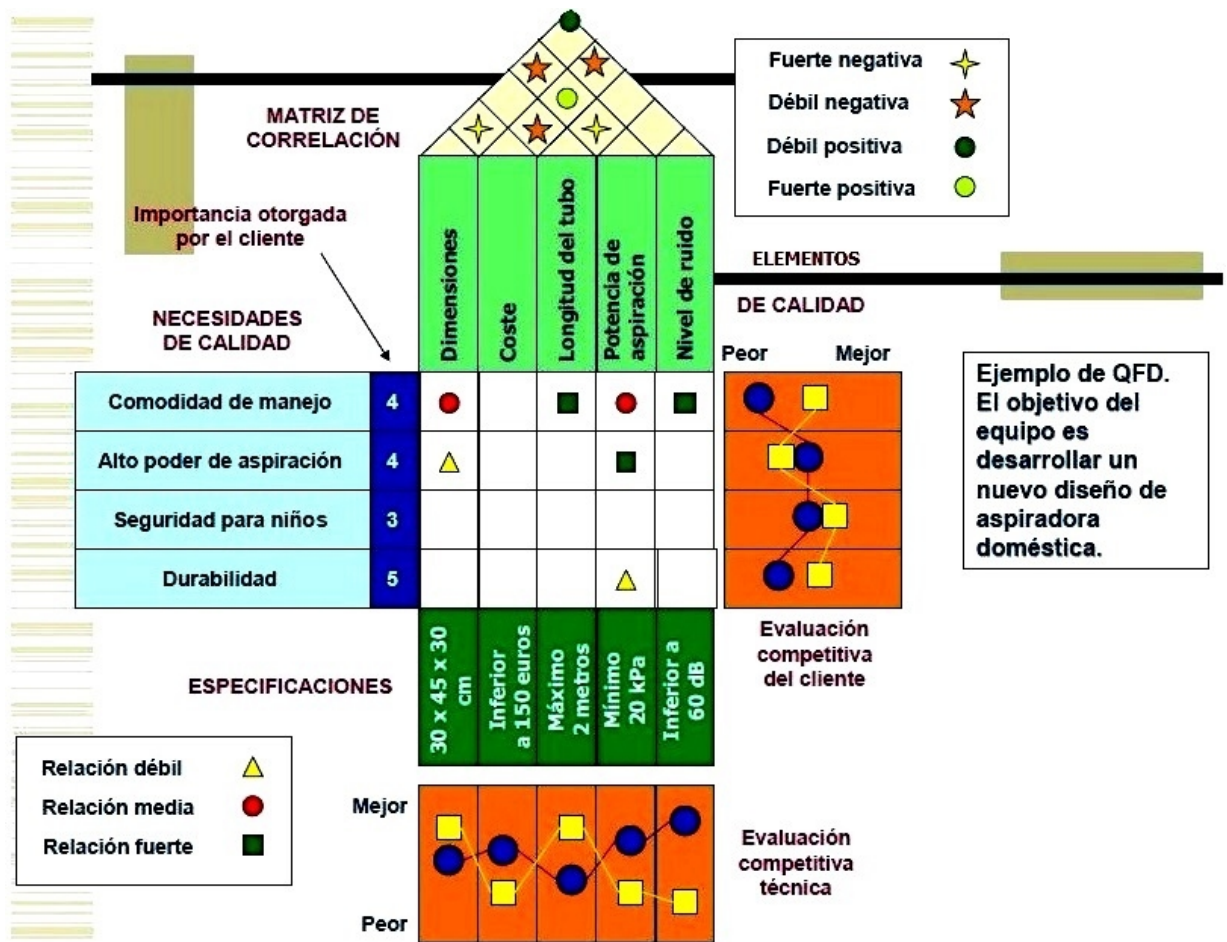


Figura 17: Despliegue de la función de la calidad para un artefacto

Fuente: <http://www.gestion-calidad.com/archivos%20web/QFD.pdf>

2.5.4. SECUENCIA DE SELECCIÓN DE UN PROYECTO SEIS SIGMA

En la Figura 18 se pueden ver resumidos en un flujograma los pasos que se deben dar para seleccionar un proyecto Seis Sigma. En realidad, se pueden dar dos tipos de proyectos: para mejorar procesos que generan productos o servicios existentes, o para diseñar nuevos procesos, productos o servicios. En cualquiera de los dos casos, se debe realizar una declaración de la oportunidad de mejora, sea al eliminar un problema, o al tener como propósito un nuevo diseño. En este último caso se habla de Diseño Seis Sigma.

Siempre el SIPOC y el QFD están en el centro de la definición de los requisitos del cliente.

Debe notarse, adicionalmente, que se sugiere tener establecido un plan de medición, antes de

proponer el proyecto a la dirección de la empresa. Esto, para poder justificar una tasa interna de retorno satisfactorio para la empresa.

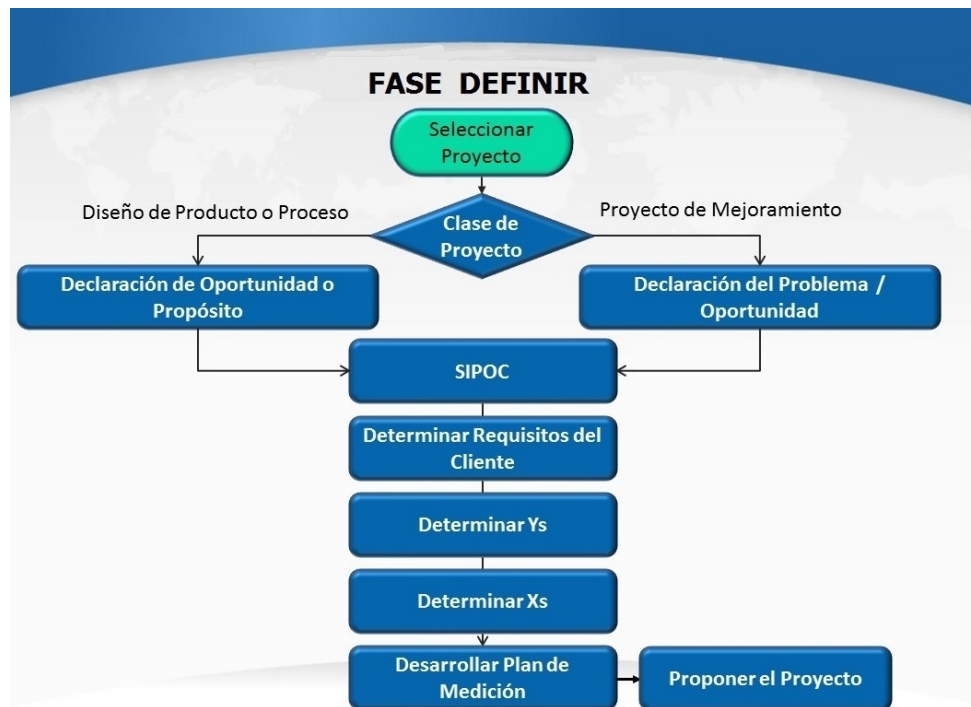


Figura 18: Secuencia de la selección de un proyecto Seis Sigma

Fuente: <http://web.cortland.edu/matresearch/QFD.pdf>

2.6. LA CULTURA SEIS SIGMA Y LAS PYMES

2.6.1. EL CAMBIO CULTURAL

En el Capítulo I se justificó la necesidad imperativa de que las PYMES adopten nuevos modelos de administración, nuevos conceptos de calidad y avanzadas herramientas tecnológicas de información. Las PYMES sustentan una porción importante de la generación de empleo y de la generación de riqueza de un país, y en todo sitio se está trabajando para que las PYMES se desarrollen y fortalezcan.

Cuando una empresa decide emprender en Seis Sigma, en realidad debe haber adoptado con anterioridad una forma estratégica de administración: **La Gestión por Procesos**.

Esta estrategia administrativa ha demostrado ser muy eficiente para eliminar las causas de los problemas de la organización, eliminar trabajos innecesarios, enfocarse en la generación de valor y para propiciar la mejora continua. Por eso mismo, los modelos ISO 9000, EFQM y Malcolm Baldrige ubican la adopción de esta estrategia administrativa entre sus principios básicos.

La adopción de la Gestión por Procesos ya implica un cambio en la cultura de la organización, respecto de la administración tradicional, como puede verse en la Tabla 8

Tabla 8:

Cambio de cultura organizacional en la gestión por procesos

<u>ORGANIZACIÓN TRADICIONAL</u>	<u>ORGANIZACIÓN CON GESTIÓN POR PROCESOS</u>
Enfocada en la organización	Enfocada en los procesos
Trata con empleados	Trata con personas
El empleado hace su trabajo	Cada persona ayuda a las demás a realizar sus actividades
Se controlan los empleados	Se desarrollan las personas
Se evalúa el desempeño de los empleados	Se evalúa el desempeño de los procesos
¿Quién es el culpable?	¿Qué causa ocasionó error en el proceso?
Se establecen funciones	Se administran procesos
Comandan gerentes	Comandan líderes
Orientación a las tareas	Orientación a los clientes y a los procesos
Interesa el desempeño individual	Interesa el desempeño del grupo
Enfoque en la función	Enfoque en los proceso

Fuente: Mejía, B. (2007). Gerencia de Procesos. Bogotá; Ecoediciones Ltda.

El avance hacia la Metodología Seis Sigma, como uno de los mejores instrumentos existentes de apoyo a la Gestión por Procesos (y a la mejora continua de los mismos) requiere

de un cambio de cultura y actitudes que va un poco más allá. Para ser exactos, requiere de un cambio de enfoque hacia la resolución organizada y con base científica de las causas de la variabilidad de los procesos. En esta nueva cultura todos, a todo nivel, deben manejar datos más que nada y ser ágiles en la aplicación de las herramientas administrativas y estadísticas propias de la metodología. Nada es ahora empírico, ni basada en la experiencia. Es el método científico el que debe tomar el papel protagónico de ahora en adelante. En la Tabla 9 se resumen los principales cambios culturales que deben ocurrir en el viraje de la organización hacia Seis Sigma.

Tabla 9:

CAMBIO DE CULTURA ORGANIZACIONAL EN LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA

<u>ORGANIZACIÓN TRADICIONAL, SUSTENTADA POR EL MÉTODO EMPÍRICO</u>	<u>ORGANIZACIÓN CON SEIS SIGMA, SUSTENTADA POR EL MÉTODO CIENTÍFICO</u>
Se basa en la experiencia	Se basa en datos
Es intuitiva	Es metodológica
La Prueba – Error es la forma de resolver problemas	Se resuelven problemas por medio del planteamiento de hipótesis
La resolución de problemas lleva demasiado tiempo	La resolución de problemas puede realizarse en corto tiempo
El registro de datos y hechos es incierto	Todo está documentado
El método utilizado es el empírico	El método utilizado es el científico

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En base a las premisas establecidas, es momento de dilucidar si se puede pensar en una implantación exitosa de la metodología Seis Sigma en las PYMES ecuatorianas. Hay que analizar si su estructura, tamaño, situación económica y el grado de formación académica de sus directivos facilitan o no su acceso a esta metodología. Si es factible o no que asimilen en su cultura los cambios exigidos por Seis Sigma.

2.6.2. FACTIBILIDAD DE SEIS SIGMA PARA LAS PYMES

Siguiendo la corriente mundial de apoyo irrestricto a las PYMES, en el Ecuador se han creado varios organismos, políticas de ayuda y programas orientados hacia ese objetivo. Así, se encuentra el Centro de Investigaciones Económicas de la pequeña y mediana industria (CIEPYMES), creado a fines del 2009, mediante un convenio entre la FLACSO y el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO). En el aspecto económico, el SERCOP otorga a las PYMES un margen preferencial de hasta el 10% en los procesos de contratación pública. Se han implementado programas que tienen en su mira a las empresas ecuatorianas en general y a las PYMES en particular, como “CreEcuador”, “EmprendEcuador”, “InnovaEcuador” y “Hace bien, Hace mejor”. Estos son programas que intentan proveer asesoría, información, capacitación, financiamiento y estímulo al emprendimiento y a la innovación. También mejorar las prácticas empresariales.

El Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO) no sólo apoya a las PYMES a través de Compras Públicas, sino que tiene para ellas programas de acceso a las tecnologías de información y comunicaciones. Además, tiene programas de apoyo al sector artesanal y de obtención de fondos destinados a las actividades productivas de las PYMES. CODEPYME ECUADOR, en coordinación con el fondo FONDEPYME, tiene por objetivo incrementar la productividad y competitividad de las PYMES.

El Ministerio de Turismo, con su programa “Turismo para todos”, apoya a emprendedores y microempresarios en zonas con potencial turístico y elevados índices de pobreza.

En resumen, el apoyo político a las PYMES está presente con mucha fuerza. El apoyo académico no se ha hecho muy evidente, pero es probable que los proyectos de vinculación con la colectividad que ahora por ley deben desarrollar las universidades propicien un acercamiento hacia este importante motor económico.

Por otro lado, refiriéndonos específicamente a la metodología Seis Sigma, debe insistirse en que a todo nivel se considera que las organizaciones más pequeñas son más ágiles a la hora de reaccionar y enfrentar retos como los que conlleva la implantación de este tipo de nuevas metodologías de trabajo. Tienen menos arraigados paradigmas de índole cultural, sus empleados están acostumbrados a trabajar de forma cercana y proactiva, la estructura es más plana y todo ello contribuye a que haya menos conflicto entre las diferentes áreas funcionales. Es más fácil identificar a los empleados más motivados, y a ellos capacitarlos. Se estima que todo esto proporciona un ambiente ideal para iniciar el enfoque Seis Sigma⁶³.

Entre las desventajas que enfrenta una empresa pequeña o mediana se mencionan los mayores costos unitarios de capacitación Seis Sigma de sus empleados, pues generalmente están en condiciones de menor ventaja de negociación que sus hermanas mayores; la vulnerabilidad ante las bajas temporales de productividad debidas a la intensa dedicación inicial de los empleados a la capacitación y al arranque de la implementación de la metodología, dejando de lado sus actividades habituales; y el mayor plazo de retorno de la inversión respecto de las empresas más grandes. Sin embargo, la mayoría de expertos están de acuerdo en que, al final del día, las empresas pequeñas terminarán dándose cuenta de que los beneficios obtenidos son proporcionalmente muy parecidos a los que obtienen las grandes corporaciones cuando adoptan la metodología Seis Sigma⁶⁴.

Hay expertos en Seis Sigma que ponen en tela de juicio el grado de éxito que puede alcanzar la implantación de la cultura Seis Sigma en las pequeñas (medianas en el caso de Ecuador) empresas, pero el consenso mayoritario es que se puede y se debe implantar la metodología si se quiere llevar a estas empresas a otro nivel de calidad de negocio. Estos últimos insisten en que es más fácil hacerlo que en empresas grandes o muy grandes, y se han publicado libros, guías en línea, artículos y sugerencias para asegurar el éxito de un proyecto de

⁶³ http://qualityamerica.com/Knowledgecenter/leansixsigma/does_six_sigma_work_in_smaller_companies_.asp

⁶⁴ <http://www.sixsigmaonline.org/six-sigma-training-certification-information/articles/can-six-sigma-work-for-small-companies.html>

esta naturaleza. Los conceptos, condiciones, infraestructura, protocolo y herramientas son los mismos que los utilizados en empresas grandes.

2.6.3. TAMAÑO Y SITUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PYMES EN EL ECUADOR

Se dice que las pequeñas empresas hacen todo lo que hacen las grandes empresas, sólo que más rápido. Sin embargo, cuando se trata de implantar la metodología Seis Sigma, y debido a sus limitados presupuestos, a diferencia de sus hermanas grandes, estas empresas no pueden permitirse cometer errores. No se pueden permitir el lujo de repetidas implementaciones Seis Sigma, por lo que se aconseja la guía de consultores externos, sobre todo en las etapas iniciales⁶⁵. Es decir, si bien propicia la aparición de excelentes resultados, la inversión que implica la creación y el mantenimiento de una estructura Seis Sigma debe analizarse con cuidado para determinar si puede ser financiada con los recursos con que cuenta una PYME.

Respecto del número de personas dedicadas todo el tiempo a Seis Sigma en una empresa, es decir los Master Black Belts y los Black Belts, es de acuerdo general que es recomendable un Master Black Belt por cada 1.000 empleados, y un Black Belt por cada 100 empleados. Es decir, 10 Black Belts por cada Master Black Belt. Los Green Belts tienen una dedicación a tiempo parcial. En las empresas que han aplicado exitosamente Seis Sigma el número de personal y el tiempo dedicados al mantenimiento de la metodología es de aproximadamente el 1% del total disponible. Un Black Belt típico puede terminar entre 5 y 7 proyectos al año, generando un ahorro promedio de USD 175.000 durante ese período⁶⁶. Su capacitación en el país puede bordear los USD 5.000, asumiendo un tercer nivel previo.

Por supuesto que se podría tener un Máster Black Belt por cada menos de 100 empleados, pero no es eso lo que indica la experiencia de miles de empresas. El recurso de

⁶⁵ http://www.qualitydigest.com/april05/articles/02_article.shtml

⁶⁶ Pyzdek, T., y Keller, P. (2010). *The Six Sigma Handbook*. USA; McGraw-Hill.

personal dedicado no debería superar el 1%. Entonces, la presencia de un Black Belt se justifica cuando la empresa llega a un mínimo de 100 empleados. En ese nivel de recurso humano, a cambio de capacitar y pagar un Máster Black Belt, puede pensarse en un consultor externo.

Los promedios de tamaño, por número de empleados, de las PYMES en el país pueden verse en la Tabla 10.

Tabla 10:

Número promedio de empleados por tipo de empresa (pyme) ecuador - año 2012

TIPO DE EMPRESA	NUMERO PROMEDIO DE EMPLEADOS
MICROEMPRESA	1
PEQUEÑA EMPRESA	9
MEDIANA EMPRESA	40

Fuente: Consejo de Cámaras y Asociaciones de la Producción. CEPAL / CELADE 2003-2007

Dado el promedio de empleados, que incluye casi siempre a los propietarios del negocio, para las micro y pequeñas empresas una estructura convencional Seis Sigma es inalcanzable. Probablemente sí lo es para algunas medianas empresas.

Como los datos presentados en la Tabla 10 son promedios, y no se conoce su grado de dispersión, sólo puede aventurarse que debe haber algunas empresas medianas que sobrepasan los 100 empleados, y para las cuales sería factible adoptar una forma de cultura Seis Sigma, dependiendo naturalmente de si el monto de sus ingresos les permite hacerlo. No serán la mayoría, pero ellas son excelentes candidatas para el emprendimiento. Si una mediana empresa con recursos está dispuesta a capacitar y a dedicar a tiempo completo a algunos de sus mejores empleados como Master Black Belt y Black Belt, a capacitar Green Belts, y a dedicar como el 1% del tiempo de su fuerza de trabajo exclusivamente a la implantación de la

metodología⁶⁷ (para una empresa mediana con 40 empleados esto significa como 832 horas hombre al año, o 104 días laborables completos de una persona), se estima que puede tener buenas probabilidades de éxito.

Respecto del monto de dinero anual que mueven las PYMES del Ecuador, hay que tener presente que éstas generan aproximadamente el 30% del PIB no petrolero, y que éste fue como el 87% del PIB total en el 2013. El PIB total del país llegó a USD 89.834 millones en 2013 y será probablemente de USD 98.895 millones en 2014. Por tanto, nuestras PYMES generarán entre USD 23.450 millones y USD 25.800 millones para cada uno de esos años, respectivamente. Por todos esos datos, se calcula que las pequeñas y medianas empresas tienen actualmente un ingreso promedio de USD 180.000 por año.

Ese es un promedio general, pero hay sectores que reciben más dinero por su trabajo, lo que les posibilita ser mejores candidatos a invertir recursos en capacitación y mejora técnica, como se ve en el ANEXO 3 (este anexo presenta una diferencia de menos del 1% respecto de la Tabla 1, en cuanto al número de Pequeñas y Medianas empresas del Ecuador). Con los datos de ese anexo puede calcularse que son las empresas manufactureras las que reciben, en promedio, los mayores ingresos anuales (USD 230.790); seguidas por las empresas dedicadas al comercio (USD 172.207); y por las empresas de servicios (USD 55.453). Las cifras obtenidas indican que son las pequeñas y medianas empresas manufactureras las que tienen recursos relativamente más elevados que pueden destinar a su mejora administrativa. Eso, unido al hecho de que Seis Sigma es muy afín a este tipo de empresas, pues allí nació, convierte a las pequeñas y medianas empresas manufactureras en las más oñcionadas para aplicar Seis Sigma. No todas tendrán los recursos suficientes, pero algunas sí.

De cualquier manera, hay muchos ejemplos de mejora de procesos puntuales por medio de la utilización de la metodología Seis Sigma, sea por medio de consultores externos, o debido a que algún personal de la empresa se ha capacitado en el uso de las herramientas y del

⁶⁷ http://qualityamerica.com/Knowledgecenter/leansixsigma/does_six_sigma_work_in_smaller_companies_.asp

protocolo y está en capacidad de desarrollar proyectos relativamente sencillos. Este camino podría ser el adecuado para iniciar a las PYMES del país en el conocimiento y manejo de formas más avanzadas y técnicas de administración. Más adelante, en el capítulo correspondiente, se describen algunos casos exitosos de mejoras puntuales de procesos por medio de Seis Sigma.

Debe recordarse que las cifras de mortalidad de las PYMES en la región son alarmantes. Según la Comisión para América Latina y el Caribe (CEPAL), en la actualidad, apenas entre el 25% y el 50% se mantienen vivas luego de los tres años de existencia. Se estima que el 80% de ellas no pasa de los 5 años de vida y que el 90% no llega a los 10. Por eso mismo, las empresas que quieran perdurar y adaptarse al cambio deberán buscar necesariamente una reestructuración en la manera de administrar sus recursos⁶⁸.

La situación es más apremiante aún para las PYMES del país pues se estima que sólo el 30% de ellas usan efectivamente las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (TICs), contra un 50% promedio registrado en otros países de Latinoamérica (especialmente Costa Rica, Argentina y Chile)⁶⁹.

2.6.4. NIVEL PROFESIONAL DE LOS DIRECTIVOS DE LAS PYMES EN QUITO

Según un estudio de la Cámara de la Pequeña Industria de Pichincha (CAPEIPI), en el año 2012, basado en un censo a 388 empresas, el 67% del personal de las PYMES de la capital del país está dedicado a la actividad productiva, el 14% está en el área de administración, el 10% trabaja en ventas y el 9% final hace control de calidad y mantenimiento. El 14,8 % del personal tiene formación universitaria, y el 1,3% ha realizado posgrados. Estos porcentajes demuestran dos aspectos importantes: 1) que en las PYMES existe personal suficiente como para dedicar parte de su tiempo al desarrollo de proyectos Seis Sigma y 2) la presencia en las PYMES de

⁶⁸ <http://ekosnegocios.com/negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=1221>

⁶⁹ Encuesta Nacional de Micro, Pequeñas y Medianas empresas de la industria manufacturera, 2007.

profesionales de buen nivel que pueden entender la necesidad de modelos de administración que eleven el nivel de competitividad de sus empresas.

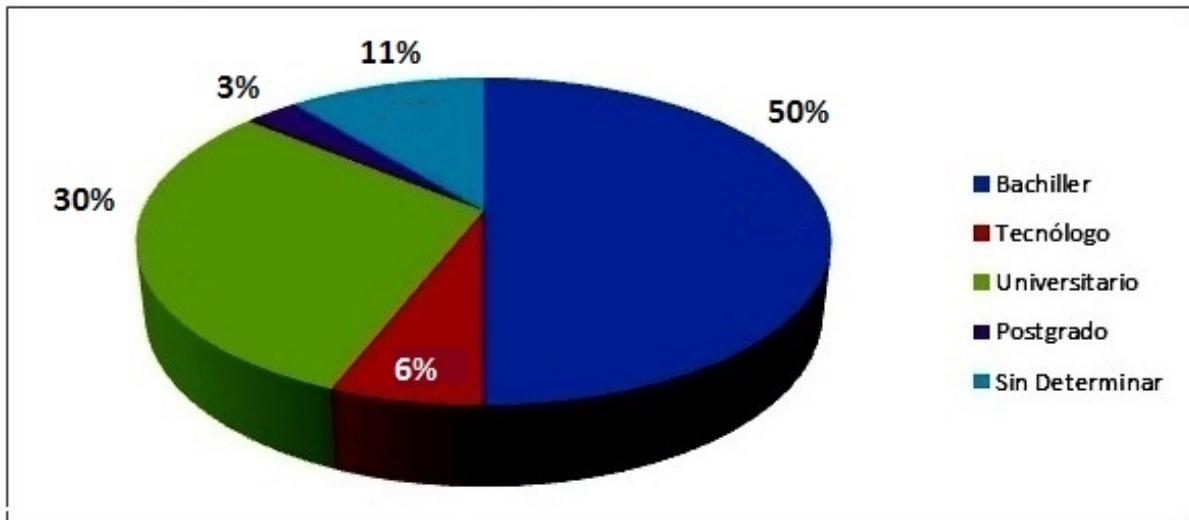


Figura 19: Formación académica de los empleados de las PYMES - Quito
Fuente: CAPEIPI, 2012

El nivel de formación académica del personal empleado por las PYMES también tiene una incidencia positiva o negativa a la hora de implantar en la organización nuevas metodologías o formas de administración. De hecho, los Master Black Belt, los Black Belt y los Green Belt deben salir de entre las filas de los empleados, que son los que conocen realmente los procesos que están operando en la empresa. No se menciona en la literatura disponible algún nivel específico de educación como requisito para los tres grados de certificación existentes, pero en vista de la cantidad y de las características (sobre todo estadísticas) de las herramientas requeridas, se puede inferir que al menos un tercer nivel es deseable. Mejor si es en áreas afines a la administración.

En términos generales, el 33% de los empleados de las PYMES de Quito, es decir la tercera parte de ellos, tienen formación universitaria, incluso de posgrado. Si se incluyen a los tecnólogos, el porcentaje sube al 39%. Esto puede verse en la Figura 19. Sería interesante comparar estos porcentajes con los correspondientes de las empresas grandes, pues están demostrando que las pequeñas y medianas empresas no se están manejando de manera

improvisada. Incluso si se cumple la norma de que las PYMES son generalmente administradas por sus dueños, fundadores o hijos de ellos, se puede apreciar que existe una elevada preocupación por estudiar y capacitarse, por llevar exitosamente adelante el emprendimiento.

En cuanto al nivel de formación académica del personal directivo de las PYMES de Quito, los resultados referidos específicamente a la formación del máximo directivo, son notables, tal como se ve en la Figura 20. Los directivos con grado de bachiller o de tecnólogos son una minoría. El 76% de ellos tienen títulos de tercer, cuarto y quinto nivel, generalmente en el área de actividad de la empresa que ellos gerencian.

Los datos hablan por sí solos. El grado de solvencia académica de los gerentes de las PYMES de Quito es realmente alto. No tiene por qué ser muy diferente en otras regiones del país. Y este aspecto, la excelente formación de los profesionales que dirigen estas empresas se convierte en una garantía de éxito al momento de la implantación de la metodología Seis Sigma, si los otros factores de tamaño y económico, contribuyen también.

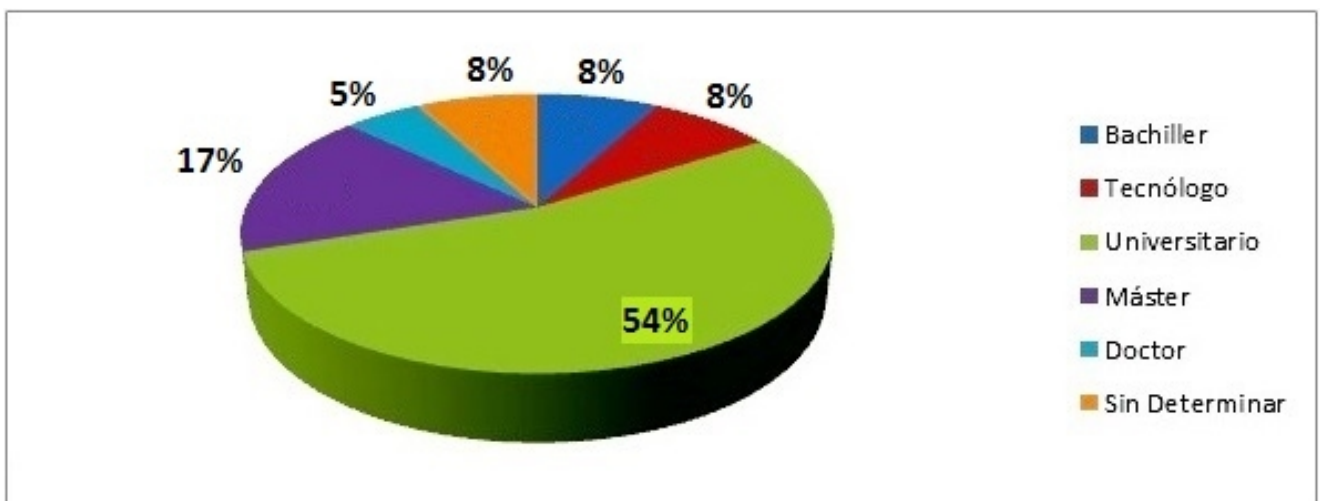


Figura 20: Formación académica del máximo directivo de la empresa

Fuente: CAPEIPI, 2012

2.6.5. PRESENCIA DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA EN EL ECUADOR

La presencia de la metodología Seis Sigma en muchas de las grandes empresas del mundo es una realidad. Se trata ahora de determinar, en la medida de lo posible, hasta qué punto esta metodología tiene presencia en el Ecuador, en qué tipo de empresas y en qué temas se la ha aplicado. También es de interés determinar la presencia de consultores especializados en Seis Sigma, así como los cursos y otras modalidades de capacitación que se han desarrollado en el país.

Cuando se analiza la información que da cuenta de la aplicación de Seis Sigma en las empresas ecuatorianas, se debe discernir si se trata de una implantación seria, de carácter cultural, a largo plazo; o si sólo se ha contratado consultores que apliquen la metodología de manera puntual, para resolver un problema urgente para la organización y nada más. Terminado el problema, acabada la relación con la metodología. Esto es importante porque la recomendación de los expertos es que se debe trabajar en una implantación total y permanente de Seis Sigma, si es que se quiere extraer de ella toda la potencialidad de beneficios que es posible, y además porque los problemas resueltos de manera puntual tarde o temprano tienden a reaparecer, debido a que los trabajadores y empleados que no han modificado culturalmente su forma de pensar y su manera de comportamiento, tarde o temprano también, retoman sus arraigados defectos y taras en la gestión de los procesos. Además, se debe tener presente que se existen casos en los que una empresa está capacitando en Seis Sigma a su recurso humano, preparándolo para una futura implantación.

Algunas empresas ecuatorianas que han aplicado la metodología Seis Sigma en su organización pueden verse en la Tabla 11. Allí también se menciona si se trata de una aplicación puntual o de una implantación de carácter permanente.

Tabla 11:**Algunas empresas ecuatorianas que han adoptado la metodología Seis Sigma.**

EMPRESA/Consultor	IMPLANTACIÓN PERMANENTE	APLICACIÓN PUNTUAL	RECURSO HUMANO CAPACITADO EN SEIS SIGMA
AGLOMERADOS COTOPAXI / Quali Plus	X		
TELCONET/ n.a.			X
PLYWOOD ECUATORIANA/ Management & Technology	X		
MADEVAL/ Management & Technology	X		
ARTPAQUET/ Management & Technology	X		
NETLIFE/ n.a.			X
PRONACA/ The Bottom Line		X	
SEGUROS DEL PICHINCHA/ The Bottom Line		X	
BANCO AMAZONAS/ The Bottom Line		X	
SUPRAPLAST/ The Bottom Line		X	
BRENNTAG/ The Bottom Line		X	
DIFARE/ The Bottom Line		X	
ARTEFACTA/ The Bottom Line		X	
INGENIO SAN CARLOS/ The Bottom Line		X	
VECONSA/ The Bottom Line		X	
COOPERATIVA DE AHORRO Y CRÉDITO JUVENTUD ECUATORIANA PROGRESISTA/ The Bottom Line		X	
CERVECERÍA NACIONAL/ The Bottom Line		X	
BANCO DEL PICHINCHA/ n.a.	X		

INVELIGENT/ Tesis ESPE	X		
ECUADOR BOTTLING COMPANY/ Tesis UPS		X	
INEN/ n.a.		X	
PINTUCO/ n.a.	X		
AYMESA/ Tesis EPN		X	
CHAIDE & CHAIDE S.A./ Tesis PUCE		X	

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Son sólo algunos ejemplos, una muestra, que permite sin embargo sacar extraer algunas conclusiones:

1.- La metodología Seis Sigma está presente en las empresas ecuatorianas, no se puede determinar a partir de esa muestra en qué nivel, pero hay empresas que la toman en serio, creen en ella y han invertido en su implantación.

2.- En la mayoría de casos se trata de aplicaciones puntuales, en las que el consultor externo es contratado para trabajar en la mejora de un proceso específico, problemático evidentemente; aplica la metodología, mejora el proceso y termina su misión. Es probable que esta modalidad de aplicación de Seis Sigma abra las puertas a futuros proyectos, vaya creando una convicción de los beneficios que pueden obtenerse, encamine a los empleados por la ruta de la resolución científica de problemas, y finalmente culmine con la implantación definitiva de la metodología, pero no es el camino aconsejado por los expertos.

3.- Se la utilizado tanto en empresas de bienes como en empresas que prestan servicios. No existe motivo para pensar que con menor grado de éxito.

4.- No se han encontrado casos de aplicación de Seis Sigma a las PYMES.

Los temas de mejora puntual de proceso mediante Seis Sigma que se han encontrado son de lo más variado: Satisfacción de los clientes de un banco, Proceso de planificación de una

empresa agrícola, Reclamos de clientes, Revisión de expedientes de crédito, Venta telefónica, Precalificación de solicitudes de crédito, Productividad de procesos de impresión, Disminución de inventarios de medicina, Reducción de inventario de repuestos y consumibles, Reducción de desperdicios en proceso de envasado, Atención al cliente, Desarrollo de software, Productividad de línea de producción de queso fresco, Productividad de una empresa productora de cloro, Proceso de elaboración de carpetas de especificaciones técnicas, Reducción de pérdidas en envasado de café, etc. etc. Estos son algunos casos conocidos de aplicación puntual de la metodología. Al interior de las empresas con un equipo Seis Sigma permanente, como ocurre en el Banco del Pichincha, es usual que se estén desarrollando varios proyectos simultáneamente.

Los datos expuestos ponen en evidencia el conocimiento que el medio empresarial tiene de Seis Sigma, aunque no se puede inferir conclusiones respecto de la actitud del universo entero de empresas. Otro indicio de que esta metodología es un área de interés cuando se habla de temas de gerencia empresarial es la presencia en el medio de firmas de consultoría que están dispuestas a capacitar y a apoyar en la implantación de la metodología: 6Sigma Ecuador, CORPORACIÓN 3D, HC CONSULTORES, IASI –Instituto Interamericano de Estadística-, INTELECTO Capacitación Integral, ISCEA Latin America, MARWEP Project Consulting Group, QualiPlus Excelencia Empresarial, SGS, SIX SIGMA SOLUTIONS, The Bottom Line. Esta información es importante porque revela que las PYMES que deseen emprender en Seis Sigma sí tienen el respaldo de consultores externos que les pueden ayudar en cualquier aspecto: capacitación, implantación, o solución de problemas puntuales en el desempeño de sus procesos.

Respecto de la capacitación procedente de la Academia, ésta existe aunque en un nivel bajo de oferta: los cursos de certificación de la Universidad San Francisco de Quito y los cursos del Centro de Educación Continua de la ESPOL.

Tabla 12:**Sectores de las empresas encuestadas**

SECTOR	FRECUENCIA	PORCENTAJE
COMERCIO	45	31%
SERVICIOS A EMPRESAS	24	17%
TRANSPORTE Y COMUNICACIÓN	19	13%
INDUSTRIA	10	7%
SERVICIOS PERSONALES	9	6%
CONSTRUCCIÓN	7	5%
EDUCACIÓN	7	5%
FARMACEUTICA	7	5%
AGRICULTURA	6	4%
FINANCIERO	6	4%
SERVICIOS PETROLEROS	3	2%
CONCESIÓN VIAL	1	0,5%
ENTRETENIMIENTO	1	0,5%
TOTAL	145	100%

Fuente: González, T.Y., & Insuasti, R.F. (2004). *Diseño del modelo de una empresa proveedora de software multimedia para capacitación en gestión empresarial. Caso de aplicación: módulo de capacitación en liderazgo empresarial*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

No existen informes actualizados referentes a la actitud favorable o desfavorable que tienen la generalidad de empresas nacionales respecto de una potencial implantación de Seis Sigma, pero sí existe un estudio, parte de una tesis de maestría de la Escuela Politécnica Nacional, realizado en el año 2004, que reporta algunos datos valiosos. El estudio se basó en las encuestas realizadas a 145 empresas de Quito, extraídas de las 1.000 mejores de ese tiempo. En realidad, los autores debieron trabajar con 303 empresas para poder obtener la respuesta del número de empresas exigidas como tamaño apropiado de muestra (Ver ANEXO 4). Los sectores a los que pertenecían las 145 empresas encuestadas pueden verse en la Tabla 12.

Los trabajos de la investigación se enfocaban en varios aspectos, pero uno de ellos exploraba las preferencias de los directivos de las empresas respecto de los temas de capacitación en gerencia empresarial para su recurso humano. Debe aclararse que de las 145 empresas, el 62% (90 empresas) tenían en mente planes de capacitación para su personal, y 68

(el 46%) tenían programados cursos de capacitación en temas de gerencia empresarial. Las opiniones de los directivos se presentan en la Tabla 13, debiendo tenerse en consideración que cada uno de ellos podía elegir varios temas como sus principales opciones.

Tabla 13:
Temas de gerencia en los planes de capacitación

SECTOR	FRECUENCIA	PORCENTAJE
LIDERAZGO	53	15%
TRABAJO EN EQUIPO	53	15%
GESTIÓN POR PROCESOS	46	13%
CALIDAD TOTAL	42	12%
ADMINISTRACIÓN ESTRATÉGICA	35	10%
MANEJO DE PROYECTOS	32	9%
GESTIÓN DEL TALENTO HUMANO	32	9%
NEGOCIACIÓN Y CONFLICTO	28	8%
INTELIGENCIA EMOCIONAL	14	4%
SEIS SIGMA	7	2%
COACHING	3	1%
EMPOWERMENT	3	1%
SEGURIDAD Y MEDIO AMBIENTE	1	0,25%
SERVICIO AL CLIENTE	1	0,25%
DESARROLLO HUMANO	1	0,25%
5 "S"	1	0,25%
TOTAL	353	100%

Fuente: González, T.Y., & Insuasti, R.F. (2004). *Diseño del modelo de una empresa proveedora de software multimedia para capacitación en gestión empresarial. Caso de aplicación: módulo de capacitación en liderazgo empresarial*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Puede verse que el tema referente a Seis Sigma no es de los más opcionados, según los resultados del estudio que se analiza, pero debe tomarse en cuenta que el mismo se realizó hace diez años, cuando Seis Sigma en el mundo entero no había alcanzado todavía la relevancia que ahora tiene, y que además la mayor parte de las empresas encuestadas (el 77%) pertenecen al sector de servicios. Sólo el 10% de las empresas estaban en el área de la manufactura, y hace una década, en este sector precisamente estaba tomando impulso Seis Sigma, pues allí nació. Por esas consideraciones, podemos deducir con razonable grado de seguridad que, al momento, esta metodología debe superar con creces el porcentaje de aceptación detectado en el estudio de la tesis desarrollada en 2004.

Aparentemente, como está ocurriendo en todo el mundo, Seis Sigma ha llegado al Ecuador para quedarse.

3. BASES ESTADÍSTICAS DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA

3.1. LA MÉTRICA SEIS SIGMA Y LA VARIABILIDAD

La Metodología Seis Sigma necesita medir de forma objetiva el desempeño inicial (línea de base) y la mejora conseguida en los procesos. Como uno de los fundamentos clave de los ingenieros de Motorola fue que las salidas de los procesos siguen casi siempre una distribución normal de frecuencias, ellos decidieron que la métrica a utilizar se sustentaría en la Desviación Estándar, sigma σ . Este parámetro estadístico mide la magnitud de la variación (dispersión) de los datos aleatorios alrededor de su promedio en una Distribución Normal. Otro aspecto importante que ellos observaron consistía en que la calidad es inversamente proporcional a la variabilidad del proceso. Es decir, la variabilidad alrededor de la especificación exigida por la gerencia o, mejor, por el cliente.

Los defectos, que se originan cuando la variabilidad de la salida de un proceso excede ciertos límites, siguen también una Distribución Normal en su frecuencia de apareamiento. El ruido que influye en los procesos, en forma de causas aleatorias no asignables a algún factor que pueda manejarse, también sigue una Distribución Normal. Además de eso, si es que algún proceso no sigue una Distribución Normal en sus resultados, defectos o ruido, el **Teorema del Límite Central** hace posible “normalizarlos”.

Seis Sigma no sólo utiliza la Distribución Normal en sus análisis. También usa las distribuciones Chi Cuadrado, t de Student, F, Binomial, Poisson, Geométrica e Hipergeométrica. Pero las distribuciones Chi Cuadrado, t de Student y F, en el fondo, no son más que casos particulares de la Distribución Normal; y las distribuciones Binomial, Poisson, Geométrica e Hipergeométrica pueden aproximarse hacia una Distribución Normal bajo ciertas condiciones.

Es decir, la metodología Seis Sigma siempre estará trabajando en el ámbito de la Distribución Normal. De ahí que su nombre tenga incluida la palabra Sigma.

Las distribuciones Normal, Chi Cuadrado, t de Student y F se utilizan en cálculos de probabilidades cuando se han recolectado datos que son variables aleatorias continuas; y las distribuciones Binomial, Poisson, Geométrica e Hipergeométrica permiten calcular probabilidades si son variables aleatorias discretas las implicadas en el problema.

Las variables continuas son aquellas que se “miden” y admiten decimales. Por ejemplo, el peso, cualquier medida de longitud, área o volumen, la densidad, la temperatura, la velocidad, la aceleración, el monto de ventas, el monto de utilidades, los índices financieros, etc.

Las variables discretas se “cuentan” y usualmente no admiten decimales: número de hijos, número de clientes que compran por unidad de tiempo, número de unidades vendidas en el año, proporción de personas que dicen sí a la compra de un producto, número de defectos por unidad de área, número de productos defectuosos por unidad de tiempo, etc.

3.1.1. IMPORTANCIA DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL

El mundo en que vivimos está normalizado. Cuando se dibuja la distribución de frecuencias (histograma) de muchos tipos de variables medibles que aparecen por todo ámbito, entonces se encuentra la conocida campana de Gauss: la estatura de las personas, su peso, la medida de su inteligencia, su expectativa de vida, el número de goles por temporada de los futbolistas de una liga, el número de defectos en una línea de producción, los picos máximos de temperatura diarios medidos durante un año en una ciudad, el efecto en diferentes personas de la misma dosis de un fármaco, las notas de exámenes de un curso, los errores de medición de piezas en varios lotes del mismo tamaño, el consumo de un producto por los individuos de un grupo dado, el tamaño de las camadas o las tasas de metabolismo de una especie de animales, la producción de leche de las vacas de una raza dada en una granja dada, los errores cometidos en observaciones astronómicas, los períodos de gestación de los bebés, el contenido de metal

en muestras geológicas, las distancias al centro perfecto en una competencia de tiro con cualquier arma, etc. La distribución de frecuencias en forma de campana simétrica alrededor del promedio es característica de las variables que aparecen en casi todo fenómeno que nos rodea. Y la empresa no podía ser la excepción: prácticamente todo proceso que entrega un producto (bien o servicio) sigue una distribución normal en su salida, con una desviación estándar que se puede calcular, y simétrica respecto del promedio obtenido para alguna característica considerada crítica para la calidad, es decir para la satisfacción del cliente. Incluso los

La explicación científica para este hecho tan importante para la Estadística dice que siempre que se observe que una variable es el resultado de la acción simultánea (sumatoria) de muchas causas aleatorias independientes, se puede esperar que su distribución sea aproximadamente normal. No importa si esas variables independientes de entrada siguen o no, a su vez, una distribución normal. Por ejemplo, las medidas físicas de una persona son el resultado de muchas causas: genética, alimentación, cuidado de la salud, ejercicio físico, influencia ambiental... y, por tanto, se esperaría que sigan una distribución normal⁷⁰. En efecto, lo hacen.

Aunque la matemática utilizada es complicada, y está fuera del alcance de este trabajo, se puede demostrar que si se suman variables que tienen una distribución aproximadamente normal el resultado es una variable total con distribución aproximadamente normal. Es más, se puede demostrar que la suma de variables que no siguen una distribución normal, si ellas aparecen en un apropiado número n de ocasiones, puede dar por resultado una variable total que sigue una distribución aproximadamente normal⁷¹. Esto ocurre gracias a la existencia del **Teorema del Límite Central**.

La estadística provee métodos matemáticos para medir si una variable sigue o no, y en qué grado, una distribución normal. Son las **Pruebas de Normalidad**.

⁷⁰ <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7940/El%20teorema%20central%20del%20limite.pdf?sequence=3>

⁷¹ http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2008/1/EstadQuimDistConjyTCL.pdf

3.1.2. LA CAMPANA DE GAUSS

La Estadística ha generado diversas distribuciones de probabilidad para Variables Discretas (Uniforme, Binomial, Hipergeométrica, Geométrica, Binomial Negativa y Poisson), y para Variables Continuas (Uniforme, Normal, Lognormal, Logística, Beta, Gamma, Exponencial, Chi Cuadrado, t de Student y F)⁷². Pero la distribución más ampliamente utilizada es la Distribución Normal. De hecho, a la Distribución Normal se le considera una herramienta literalmente indispensable para la Estadística.

La típica campana de la Distribución Normal, o Campana de Gauss, es en realidad un caso particular de la **Función Gaussiana** (Fórmula 1), que fue desarrollada por el matemático alemán Carl Friedrich Gauss en 1.820.

Fórmula 1

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$$

LA FUNCIÓN GAUSSIANA

Aparte de su uso en la Estadística, esta función tiene una extensa aplicación en la Física y Mecánica Cuánticas, en Química Computacional, en el diseño de sistemas ópticos y de microondas, y en el procesamiento digital de imágenes.

La típica ecuación de la Función de Densidad Normal aparece cuando se especifica matemáticamente que el área bajo la curva (la integral) sea igual a 1. Entonces, la Función Gaussiana toma la forma de la función normal y la correspondiente curva en forma de campana simétrica alrededor de la media poblacional o muestral (Figura 21).

Las principales características de la Distribución Normal de Probabilidades son:

⁷² <http://dxsp.sergas.es/ApliEdatos/Epidat/Ayuda/4-Ayuda%20Distribuciones%20de%20probabilidad.pdf>

- La variable independiente X puede tomar cualquier valor entre $-\infty$ y $+\infty$, por lo que es asintótica alrededor de μ (\bar{X} en el caso de una muestra).

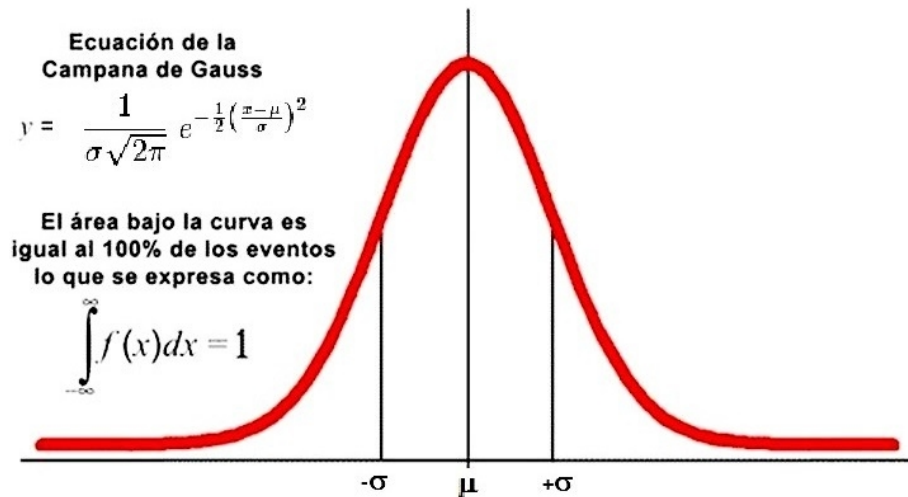


Figura 21: Distribución normal de probabilidades - Campana de Gauss
Elaborado por: Bolívar Córdor

- En μ está el valor de X de mayor ocurrencia, y allí también está la Moda.
- Conforme se acercan a la media poblacional μ (o muestral \bar{X}), los valores de X tienen mayor probabilidad de ocurrencia.
- La curva es simétrica, pues la probabilidad de ocurrencia de X va disminuyendo uniformemente hacia derecha e izquierda, en una medida que depende de la desviación estándar σ , que es un parámetro que mide la dispersión de los datos alrededor de la media.
- El área total bajo la curva es igual a 1. El área bajo la curva comprendida entre $-\sigma$ y $+\sigma$ alrededor de μ es aproximadamente igual a 0,68. El área bajo la curva comprendida entre -2σ y $+2\sigma$ alrededor de μ es aproximadamente igual a 0,95. El área bajo la curva comprendida entre -3σ y $+3\sigma$ alrededor de μ es aproximadamente igual a 0,99.

- La campana tiene dos puntos de inflexión, a la izquierda en $-\sigma$, y a la derecha en $+\sigma$.
- La forma de la curva normal depende del valor de σ . Si éste es mayor, la curva se vuelve más plana. Si es menor, significa que hay menor dispersión de los datos, menor variabilidad y que la curva es más esbelta, más apegada al eje vertical que pasa por el valor de μ .
- Si una muestra aleatoria y representativa de la población presenta una distribución aproximadamente normal, también la población tenderá a cumplir esta distribución, lo que ahorra el trabajo de analizar una gran cantidad de datos.
- El valor del parámetro poblacional σ - desviación estándar o típica- depende del grado de dispersión de los datos respecto del promedio, y la fórmula que se utiliza para calcularlo es la siguiente:

Fórmula 2

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$$

VARIANZA DE LA POBLACIÓN

En realidad, la fórmula 2 se refiere al cálculo de la varianza σ^2 . El segundo grado aparece debido a que se quiere convertir toda distancia a la media en positiva. Para calcular las Desviación Estándar Poblacional σ se saca la raíz cuadrada de σ^2 .

- Es posible hacer inferencia poblacional a partir de una muestra, pues en muchos casos es demasiado caro o imposible trabajar con toda la población. ese caso la Fórmula 3 es la utilizada.

Fórmula 3

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

VARIANZA DE LA MUESTRA

El uso de $(n-1)$ se conoce como la *Corrección de Bessel* y su objetivo es corregir el sesgo estadístico que aparece cuando se saca la raíz cuadrada de la expresión para calcular la Desviación Estándar Muestral. O sea cuando se calcula $S = \sqrt{S^2}$.

- Para todas las distribuciones normales se puede calcular la *variable tipificada Z*, que indica a cuántas desviaciones estándar está un dato X respecto de la media poblacional o muestral. Con Z se pueden calcular áreas de probabilidad (Ver la Fórmula 4). Para una muestra se usan \bar{X} y S .

Fórmula 4

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

La curva de distribución normal se encuentra en el centro de los procedimientos de Seis Sigma. Como las salidas de los procesos presentan una distribución normal, de lo que se trata es de evidenciar la mejora de esas salidas por medio de analizar lo que ocurre con su campana de Gauss (Ver Figura 22).



Figura 22: Evidencia en curva normal de la mejora de un proceso

Fuente: <http://web.cortland.edu/matresearch/SeisSigma.pdf>

3.1.3. NORMALIDAD Y TEOREMA DEL LÍMITE CENTRAL

Este valioso teorema de la Estadística establece que si una serie de datos aleatorios tienen una distribución cualquiera **no normal**, pero tienen media y varianza finitas, cuando esos datos se suman o promedian en grupos de tamaño n , los resultados de las sumas o los promedios obtenidos **sí** siguen una distribución normal.

En la Figura 23 puede verse el histograma resultante de graficar 1.000 datos que varían aleatoriamente entre 1.000 y 10.000.

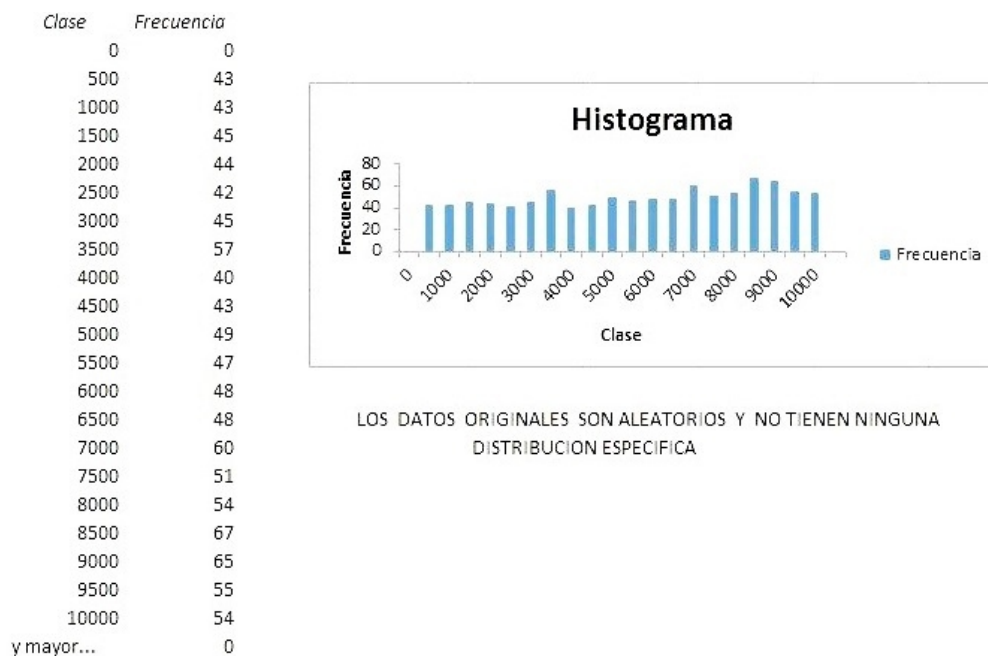


Figura 23: Distribución de frecuencias de datos aleatorios

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Como era de esperar, las frecuencias de los datos, al igual que ellos mismos, son aleatorias. Pero a continuación, los datos son promediados de 10 en 10 (podría trabajarse con las sumas también) y de esos resultados se realiza un histograma de frecuencias (Figura 24). Ahora sí, aparece la campana de Gauss, y la mayor frecuencia ocurre entre 5.000 y 5.500, que es donde se ubica el promedio de los datos aleatorios originales (no se presentan, pero es 5.300).

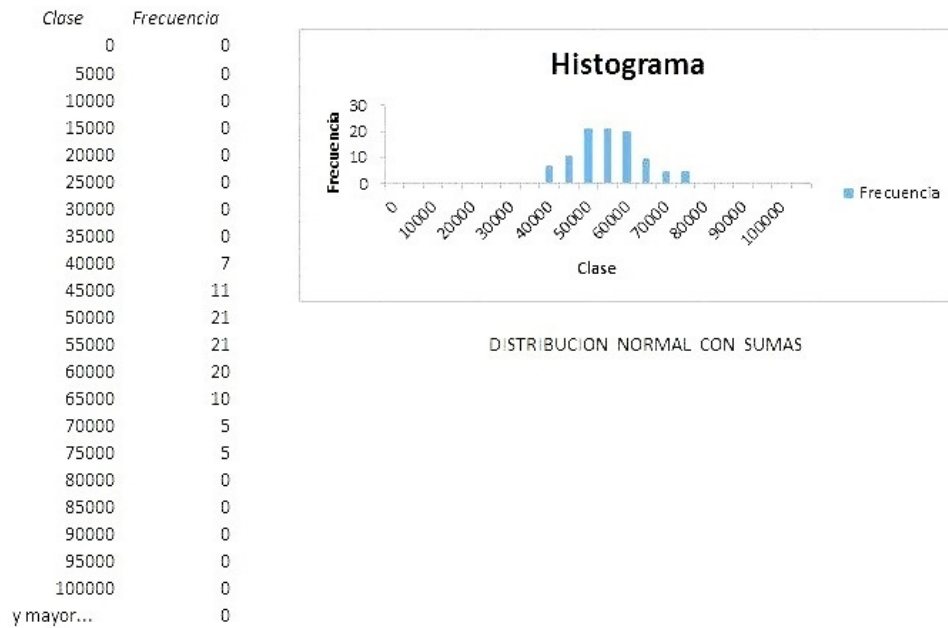


Figura 24: Distribución de frecuencias de datos promediados de 10 en 10

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Si se promedian los datos de 20 en 20, también aparece un histograma en forma de campana, pero más estrecha alrededor del mismo promedio, es decir con una desviación estándar menor (Figura 25).

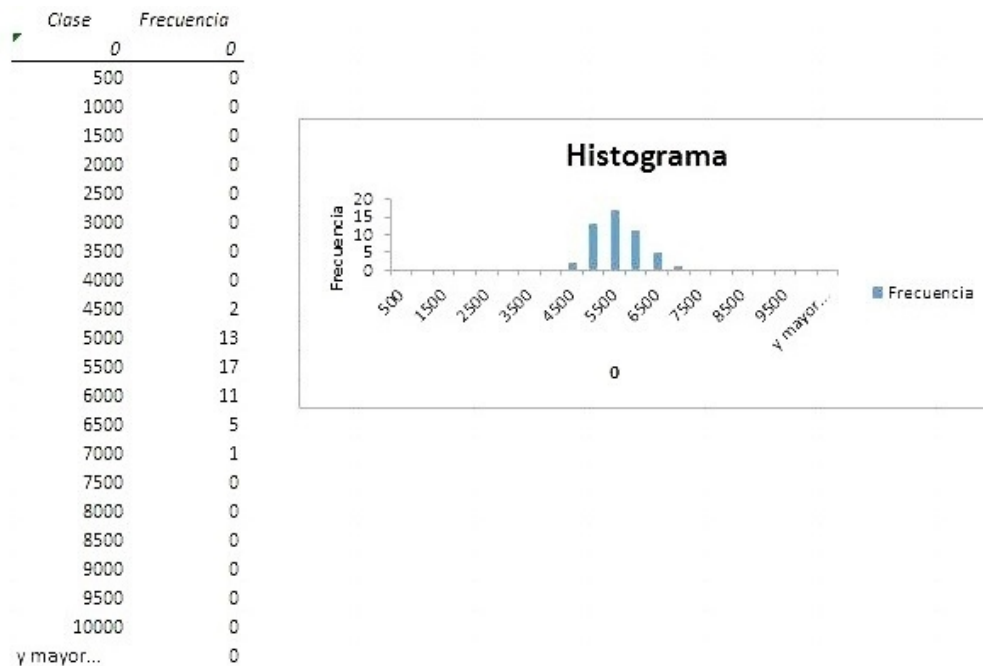


Figura 25: Distribución de frecuencias de datos promediados de 20 en 20

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Las demostraciones matemáticas del Teorema del Límite Central se encuentran fácilmente, pero existe una demostración empírica, gráfica, realizada en el ámbito del análisis de probabilidades en lanzamiento de dados, que evidencia que las sumas que están alrededor del promedio tienen mayores probabilidades de ocurrir, pues ofrecen mejores posibilidades de combinación de los datos disponibles⁷³.

La existencia del Teorema del Límite Central es determinante en la Estadística y en el manejo de las herramientas estadísticas Seis Sigma. Su precisión matemática es tan contundente, que se acepta que si una serie de datos aleatorios no sigue una distribución normal, puede cumplir con este teorema si es que el **número de datos es igual o mayor que 30**.

3.1.4. VARIABILIDAD, CAUSAS COMUNES Y CAUSAS ESPECIALES

La unidad preferente de trabajo de Seis Sigma es el proceso. Las salidas de un proceso siguen una distribución normal, y uno de los objetivos centrales es que ellas presenten un mínimo de alejamiento del promedio, sea que éste esté en el sitio correcto, del requisito, o no. El alejamiento del promedio se conoce como **variabilidad**, y lo que exige Seis Sigma es que esa variabilidad sea la mínima posible, o sea que la campana de Gauss misma sea lo más esbelta que se pueda, con la mayor parte de datos cercanos al promedio y exhibiendo las mayores frecuencias (Figura 26).

Es decir, pasar de la campana verde a la campana azul. Los niveles sigma dibujados en la Figura 26 son los correspondientes a la campana azul, que es asintótica respecto del eje horizontal.

⁷³ <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/math/dice.html>

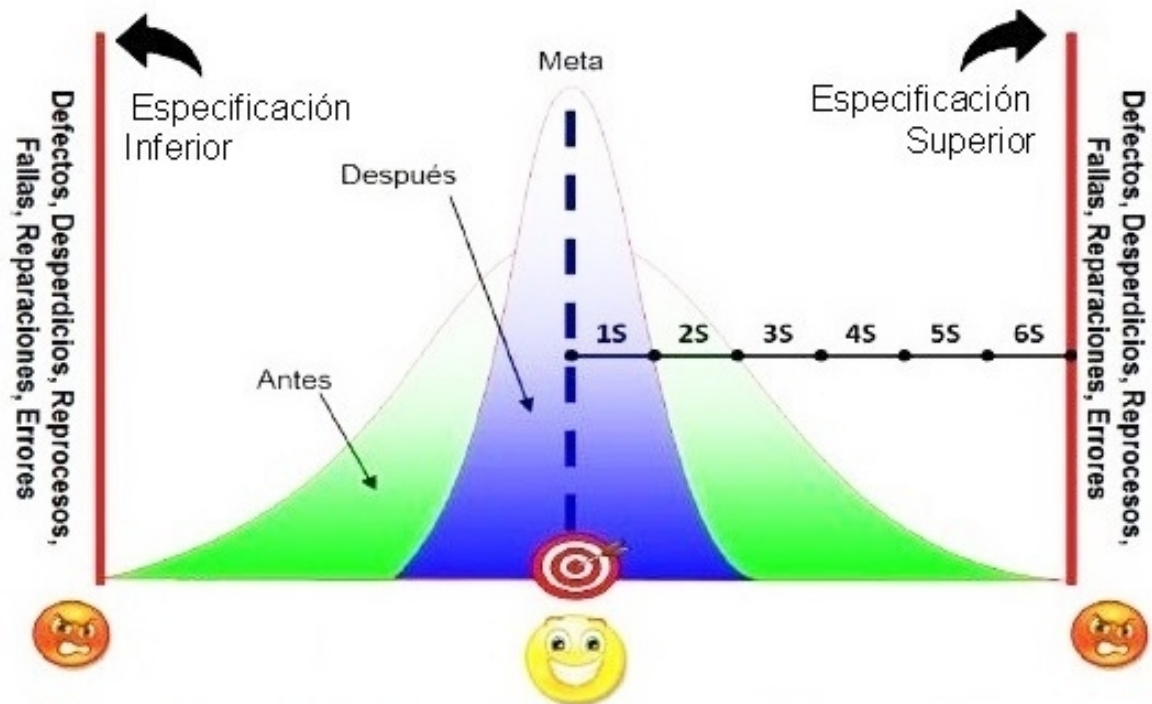


Figura 26: La variabilidad según Seis Sigma

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

La Desviación Estándar de la campana verde es como el doble de grande respecto de la Desviación Estándar de la campana azul, que se supone es la mejorada. Seis Sigma, además, exige que las salidas (productos o servicios) sin defectos estén dentro de los límites que marcan la ESPECIFICACIÓN INFERIOR y la ESPECIFICACIÓN SUPERIOR, que en la Figura 26 vuelven a referirse a la campana azul.

Es imposible que un proceso real opere siempre y exactamente en el promedio, y esta situación se debe a que existen dos tipos de causas que producen inevitablemente variabilidad: **las causas comunes, aleatorias o no asignables**, que son fuentes inherentes y naturales a la salida del proceso, y que proceden de la variación aleatoria y natural de los componentes mismos del proceso (ver Figura 27); y **las causas especiales, no aleatorias o asignables**, que son predecibles, y no debidas a causas normales. Ocurren excepcionalmente, perturbando la variable de salida del proceso. No son aleatorias y por eso mismo pueden ser detectadas de

forma relativamente sencilla por medio de las gráficas de control que se estudiarán más adelante.

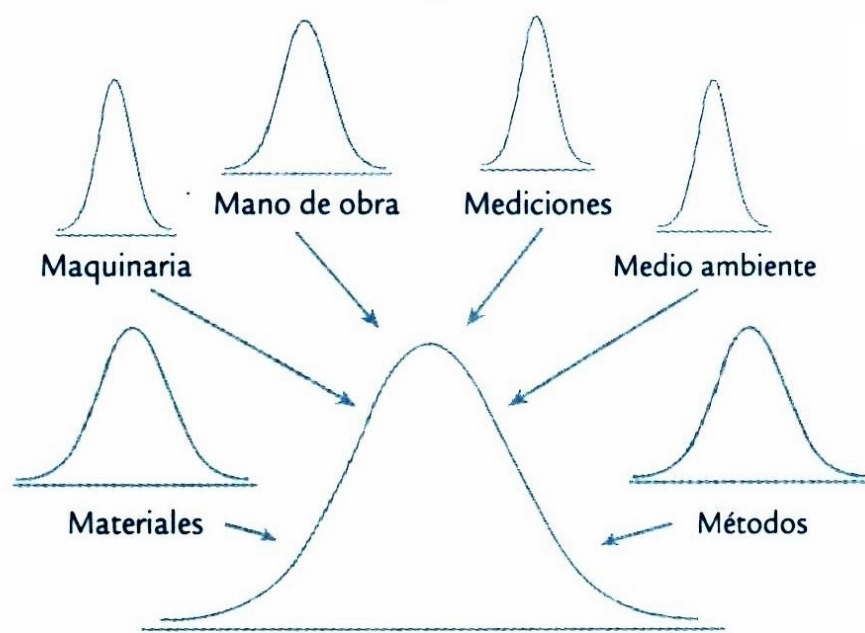


Figura 27: Las variabilidades de las 6 Ms aportan a la variabilidad total del proceso

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En la Figura 27 se supone que cada una de las 6 Ms está trabajando con normalidad, cada una con su propia variabilidad. Una máquina vieja, por poner el caso, tendrá una fuerte tendencia a variar ampliamente y eso se reflejará en la variabilidad total del proceso, pero mientras no sea posible cambiar esa máquina, sus variaciones aleatorias deberán ser consideradas como normales y toleradas en los Gráficos de Control.

Pero si, por una repentina fatiga de material por ejemplo, un resorte de esa máquina obsoleta se rompe y ella empieza a funcionar mal, con una variabilidad anormal, en ese momento aparece una causa no aleatoria, asignable. Asignable a la repentina rotura del resorte por cierto. Esta causa debe ser detectada inmediatamente por las herramientas que maneja Seis Sigma. Ellas pueden detectar exactamente cuál de las 6 Ms falló, en qué momento, e incluso predecir cuál de los elementos de esa máquina en particular ocasionó el problema.

Entonces, en lo que a variabilidad se refiere, el objetivo de la metodología es eliminar las causas asignables, y reducir al mínimo la variabilidad de las causas comunes (Ver Figura 28)

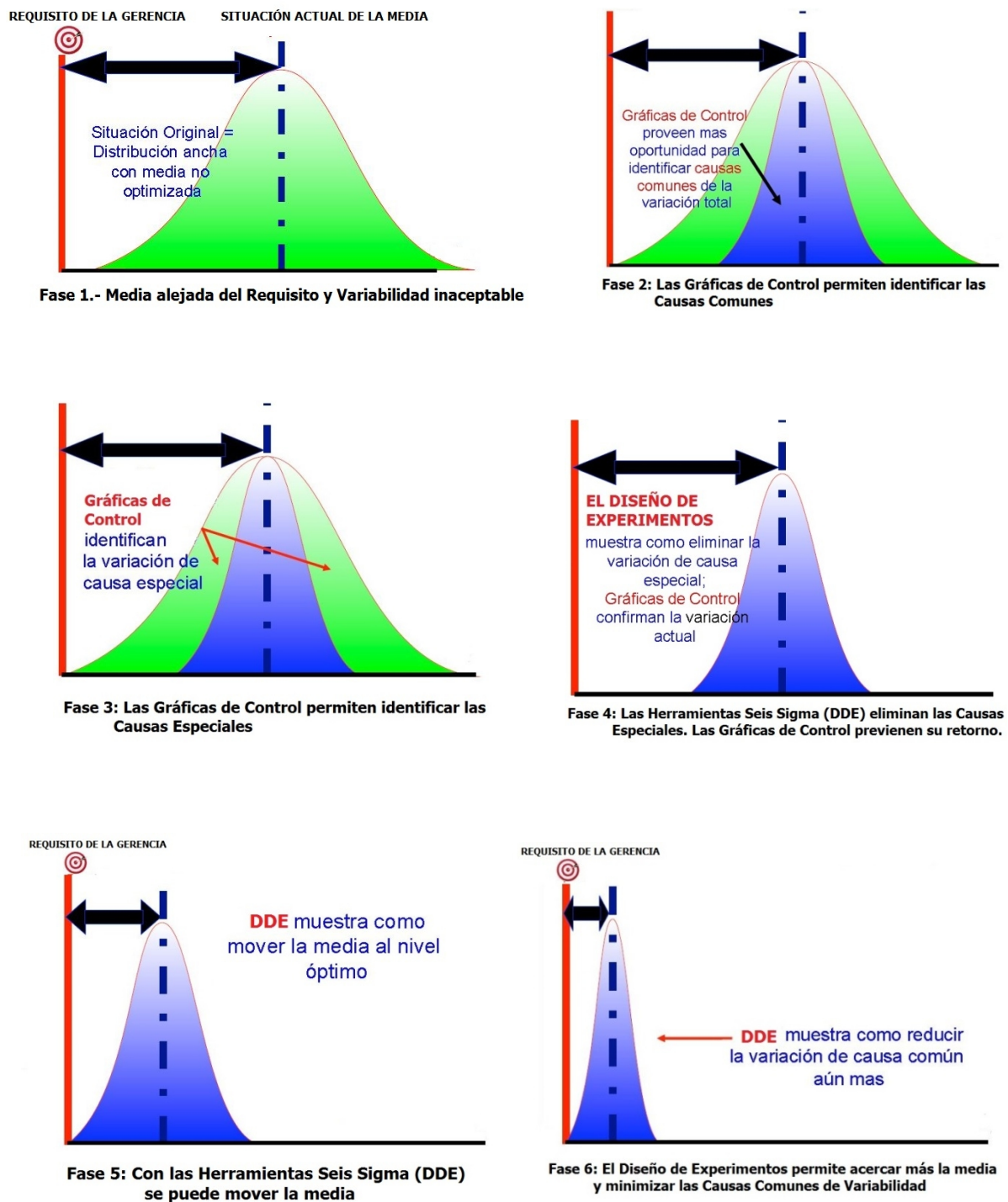


Figura 28: FASES PARA REDUCIR LA VARIABILIDAD Y MOVER LA MEDIA AL REQUISITO

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

3.1.5. LOS NIVELES SEIS SIGMA

Es debido a la variabilidad que no se puede especificar sólo un promedio, sino que se debe especificar un rango o una tolerancia alrededor de ese promedio. De manera que el diámetro solicitado para un eje no se debería expresar como de 30 mm exactamente, sino que se debería especificar, como 30 mm +/- 0,1 mm, por ejemplo. En ese caso, las especificaciones del cliente estarían entre 29.9 mm y 30.1 mm, y ese sería el rango de variación máximo permitido para la salida del proceso.

Actualmente se considera como un **proceso de clase mundial** aquel que tiene medidas, entre el límite inferior de especificación y el límite superior de especificación (y alrededor del promedio) seis desviaciones estándar a la izquierda (-6σ) y seis desviaciones estándar a la derecha ($+6\sigma$), es decir **12 σ** en total (Ver Figura 26). En el caso del eje, aplicando la Fórmula 4, y considerando $X = 29,9$ mm, $\mu = 30$ y $Z = -6$ (o $X = 30,1$ mm, $\mu = 30$ y $Z = +6$), se encuentra que la desviación estándar máxima σ permitida para el proceso de fabricación del eje es de 0,017 mm.

Si se mira una tabla de distribución normal, se encuentra que para $+6\sigma$, o sea para $Z=6$, el área bajo la curva es de 0,499999999⁷⁴ (Figura 29). Como la curva es simétrica, un área similar va a estar en el otro lado de la campana, dando un total de densidad de probabilidad de 99,9999998%. Eso significa que un proceso de clase mundial sólo debería admitir un 0.0000002% de defectuosos. Ese porcentaje equivale a 0,002 defectuosos por cada millón de veces en que ocurra ese proceso (0,002 DPMO –**defectuosos por millón de oportunidades**–), ó sólo un defectuoso por cada 500 millones de aciertos en la salida del proceso. En Seis Sigma se utiliza la nomenclatura DPMO.

⁷⁴<http://www.elosiodelosantos.com/sergiman/div/tablnorm.html>

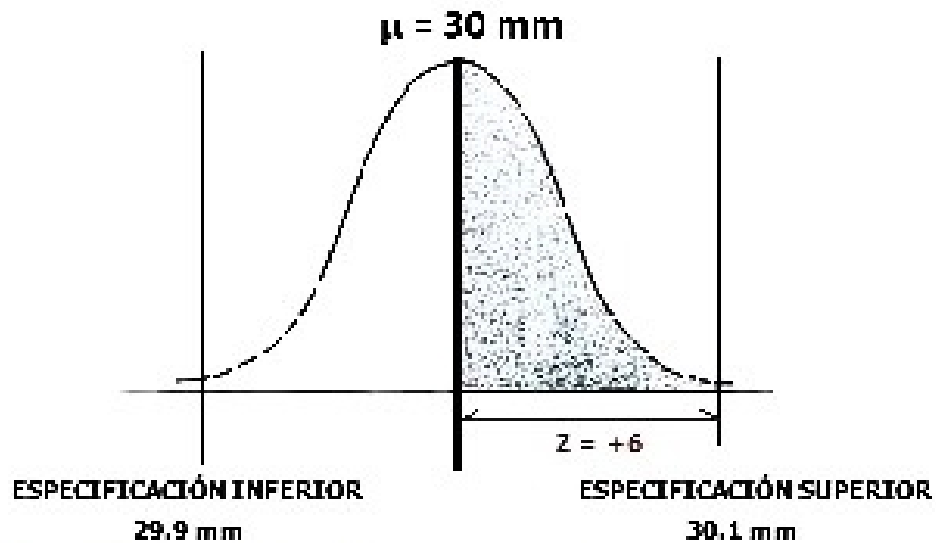


Figura 29: Área bajo la curva para $Z = +6$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDO

Si se pudiera operar manteniendo el promedio de la salida del proceso inalterable en el tiempo, los cálculos realizados más arriba serían válidos, pero la experiencia de miles de mediciones demuestra que los procesos “derivan” a largo plazo (Ver Figura 30). Su media oscila ocasionando una incertidumbre intrínseca. Por ese motivo, Seis Sigma ha desarrollado un “factor de seguridad”, ciertamente arbitrario y empírico, igual a **$1,5 \sigma$** . La deriva podría ser aparente, y más bien ser originada por errores de medición. En este caso tiene también sentido el uso del factor de seguridad.

Esto significa que cuando una empresa dice que opera a un nivel **6σ** realmente se considera que trabaja a un nivel **$4,5\sigma$** hacia el lado en que se haya desplazado el promedio. El promedio no puede desplazarse simultáneamente a derecha e izquierda, por lo que el error hallado para **$4,5\sigma$** debe finalmente dividirse para dos.

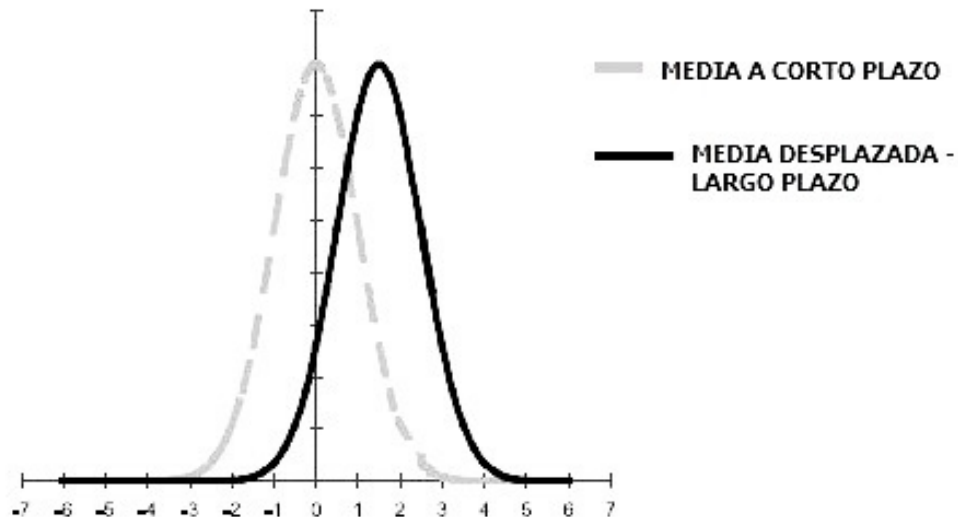


Figura 30: Deriva de proceso - media desplazada hacia la derecha

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Para un nivel **4,5 σ** hablamos de 0.0006796% de defectuosos, equivalentes a 6,79 DPMO, pero como ése es el error calculado considerando deriva hacia los dos lados simultáneamente, lo cual es imposible, la fracción de defectuosos aceptada por Seis Sigma es de 3.4 DPMO, o sea la mitad. Esto significa 1 defectuoso por cada 294.118 aciertos. En la práctica se utilizan los conceptos DPMO y PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DEL PROCESO, relacionados con el Nivel Seis Sigma desplazado (Ver Tabla 14).

Los valores de la Tabla 14 son usados para calcular el nivel sigma de un proceso. Por ejemplo, si un proceso da por resultado una pieza de metal pintado, y los posibles defectos de la pintura aplicada son: presencia de rayaduras, mala adherencia, piel de naranja, arrugas, suciedad/polvo, burbujas, cuarteados y velados, entonces se habla de **8 posibles oportunidades de defecto** a la salida del proceso de pintura. Por supuesto, los defectos tomados en cuenta para los cálculos deben ser importantes para el cliente, los que él considera inaceptables o salen fuera de sus especificaciones, es decir deben ser defectos CTQ.

A continuación, se debe definir un tamaño de muestra apropiado, es decir representativo de la población (ver apartado referente al tamaño de la muestra) y durante

Tabla 14:
Cuadro de conversión Sigma

Rendimiento (%)	DPMO	Sigma
6,68	933200	0
8,455	915450	0,125
10,56	894400	0,25
13,03	869700	0,375
15,87	841300	0,5
19,08	809200	0,625
22,66	773400	0,75
26,595	734050	0,875
30,85	691500	1
35,435	645650	1,125
40,13	598700	1,25
45,025	549750	1,375
50	500000	1,5
54,975	450250	1,625
59,87	401300	1,75
64,565	354350	1,875
69,15	308500	2
73,405	265950	2,125
77,34	226600	2,25
80,92	190800	2,375
84,13	158700	2,5
86,97	130300	2,625
89,44	105600	2,75
91,545	84550	2,875
93,32	66800	3
94,79	52100	3,125
95,99	40100	3,25
96,96	30400	3,375
97,73	22700	3,5
98,32	16800	3,625
98,78	12200	3,75
99,12	8800	3,875
99,38	6200	4
99,565	4350	4,125
99,7	3000	4,25
99,795	2050	4,375
99,87	1300	4,5
99,91	900	4,625
99,94	600	4,75
99,96	400	4,875
99,977	230	5
99,982	180	5,125
99,987	130	5,25
99,992	80	5,375
99,997	30	5,5
99,99767	23,35	5,625
99,99833	16,7	5,75
99,999	10,05	5,875
99,99966	3,4	6

Fuente: Pande, P. Neuman, R. y Cavanagh, R. (2004). Las claves prácticas de Seis Sigma. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.

el período de t el el el el

el período de tiempo seleccionado extraer aleatoriamente de la producción las **n** piezas requeridas. A partir de esas **n** piezas, quienes disponen de las herramientas físicas y estadísticas, deben determinar los defectos presentes en la muestra, y con ellos se puede calcular los DPMO, usando la Fórmula 5.

Fórmula 5

$$\text{DPMO} = \frac{\text{Número de Defectos}}{\text{Número de Piezas X Oportunidades de Defecto}} \times 1'000.000$$

Si, en el ejemplo, se analizaran 10.000 piezas pintadas, y se encontrara que 240 de ellas presentan defectos, el resultado sería 3.000 DPMO, equivalente a un nivel **4,25 σ** .

Uno de los objetivos de la metodología Seis Sigma es la practicidad. Se trata de manejar las herramientas existentes con un enfoque de obtención de resultados, sobre todo. Si bien las bases conceptuales, matemáticas y estadísticas de los técnicos que desarrollan la metodología deben ser lo suficientemente firmes como para aplicar acertadamente las herramientas, discerniendo el cómo y el cuándo para cada proyecto, no es el tratamiento teórico de esas bases lo prioritario. Ya lo hicieron y lo hacen profesionales matemáticos, estadísticos e investigadores. Lo nuestro es la aplicación. Por eso es que para Seis Sigma se han desarrollado aplicaciones, software y tablas que permiten centrar la atención en el procesamiento de los datos y en el análisis de los resultados obtenidos, más que en fórmulas y consideraciones teóricas.

Por ejemplo, en los ANEXOS 5 a 8 se presentan algunos datos útiles en el ámbito de la Métrica Seis Sigma. En el ANEXO 5 se ha calculado la probabilidad de que un proceso que funciona en determinado nivel sigma de un resultado correcto a la primera vez. En el ANEXO 6 se ha calculado la probabilidad de que un conjunto de procesos, todos operando a un mismo determinado nivel sigma, de un resultado correcto a la primera vez, considerando que la probabilidad total de los n eventos simultáneos e independientes es igual al producto de las

probabilidades individuales. En el ANEXO 7 se relaciona el nivel sigma de operación de los procesos de una organización con el grado de competitividad exhibida por la misma en el mercado. El ANEXO 8 permite hallar los DPMO aproximados para cualquier nivel sigma.

3.1.6. TIPOS DE DATOS USADOS POR SEIS SIGMA, ASIMETRÍA Y NORMALIZACIÓN

La metodología Seis Sigma trabaja preferentemente con datos CUANTITATIVOS CONTINUOS, que se miden admitiendo decimales (como las medidas de diámetro que se obtienen cuando se fabrican ejes); pero puede hacerlo también con datos CUANTITATIVOS DISCRETOS, que se cuentan y no admiten decimales (como los que aparecen, por ejemplo, al contabilizar el número de defectos presentes en un rollo de tela entregado por un proveedor; o cuando se cuentan las veces que los clientes contactados telefónicamente contratan o no contratan un servicio ofrecido); e inclusive puede trabajar con datos CUALITATIVOS O CATEGÓRICOS, que califican una característica o cualidad que no puede ser medida con números (los datos que se obtienen, por ejemplo, cuando un proceso da por resultado un producto o servicio que puede calificarse de Excelente, Bueno, Regular o Malo).

Sea cual sea el tipo de datos con el que se trabaje, esos datos deben provenir de una muestra consistente. Esto quiere decir que los ítems que conforman dicha muestra deben ser producidos esencialmente bajo las mismas condiciones.

Sabemos que la media de los datos obtenidos a la salida de un proceso puede derivar en el largo plazo (Ver Figura 31). Por eso se ha establecido el factor de seguridad $1,5 \sigma$. La deriva de la media puede ser originada por causas comunes aleatorias o por causas especiales asignables. Recuérdese que, en el corto plazo, este tipo de causas también originan que la campana de distribución normal sea ancha y muy dispersa (Ver Figura 28). Las cartas o gráficos

de control estadístico permiten determinar las causas comunes y especiales que producen efectos indeseables en el corto o en el largo plazo.

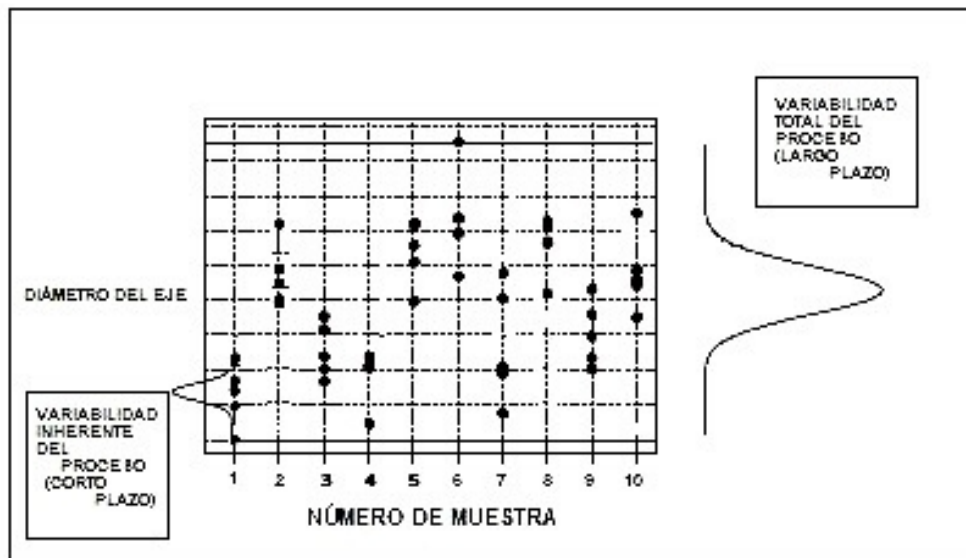


Figura 31: Desplazamiento de las medias - variabilidad a largo plazo

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

A los grupos o muestras que contienen unidades producidas bajo condiciones similares, se les llama SUBGRUPOS HOMOGÉNEOS RACIONALES o SUBGRUPOS RACIONALES. Siempre que sea posible, los subgrupos racionales deben estar conformados por unidades consecutivas.

En la Figura 31 se representan 10 grupos de datos correspondientes a la medida de cinco ejes cada vez, cuando salen del proceso en el torno. En el corto plazo, para el diámetro medido, cada muestra presenta una determinada distribución normal, con su respectiva media en el centro. Podríamos asumir que, para conseguir subgrupos racionales, cada muestra fue tomada en un mismo día y a la misma hora, de manera de garantizar que todo el entorno de producción haya sido el mismo, dentro de lo posible: mismo operario del día, mismo turno, misma máquina, misma fuente de energía, mismo aparato de medición, mismo material para los ejes, etc.

La curva normal del largo plazo es el histograma de las 50 mediciones realizadas. En este ejemplo, se pueden apreciar dos aspectos relevantes respecto de esa distribución de frecuencias:

(a) Que el histograma de largo plazo presenta una distribución normal, lo que significa que la variación o deriva de la media está siendo ocasionada por causas comunes, como pueden ser oscilaciones diarias aleatorias de potencia en la red eléctrica, que originen diferentes velocidades en el giro del torno. Si el motivo de la variación a largo plazo fueran causas especiales asignables, como por ejemplo el uso de diferentes tornos en los diferentes días o desgaste de la herramienta de corte, entonces el histograma de los 50 datos no debería presentar una distribución normal, sino más bien una distribución aleatoria.

(b) Que la variabilidad de la curva normal a largo plazo es siempre mayor que las curvas normales de corto plazo. Razón por la cual se debe dedicar igual o mayor esfuerzo a la eliminación de las causas comunes y especiales que causan la deriva de la media, que el que se dedica a la eliminación de las causas comunes y especiales que originan la dispersión de los resultados en las curvas normales de los procesos a corto plazo.

Las consideraciones de selección del subgrupo racional dependen del objetivo del análisis que se vaya a realizar. Si se quiere realizar gráficas de control que analicen la variabilidad del proceso en su comportamiento a corto plazo, sin importar la deriva de la media a largo plazo, entonces el subgrupo racional estaría conformado cada vez por una muestra de diez ejes producidos y medidos exactamente bajo las mismas condiciones. Debe señalarse que, al igual que si ocurriera la deriva, por convención, se debe aplicar el factor de seguridad $1,5 \sigma$.

Pero si el objetivo es medir la deriva de la media y la distribución de frecuencias para todos los datos obtenidos a lo largo de los diez días de toma de muestras, entonces el subgrupo racional serán las 50 piezas, con la condición de que cada vez que se realice un estudio similar,

por ejemplo para evaluar el avance de las mejoras implementadas, el mismo se efectúe con cada una de las 50 producciones y mediciones desarrollándose en el idéntico entorno productivo que les corresponda. Por eso es tan importante para Seis Sigma el registro pormenorizado y documentado de todos los trabajos de producción de un bien o servicio, y de sus correspondientes resultados.

Como se ha señalado repetidamente, la metodología Seis Sigma presupone una distribución normal de datos. Entonces, parecería que no se puede trabajar con datos que no presenten una distribución normal, o que presenten una distribución normal asimétrica. Afortunadamente, el Teorema del Límite Central permite compensar esos dos tipos de problemas, y de esa manera usar adecuadamente las herramientas estadísticas. En consecuencia y en principio, prácticamente todo tipo de proceso productivo, de bienes o servicios, o administrativo, puede ser tratado por medio de Seis Sigma.

Empezando por la asimetría, ésta se presenta cuando se trabaja con algún tipo de proceso que tiene una barrera en uno de sus extremos. Por ejemplo, si se trata de un proceso de pintura en el cual se quiere analizar el espesor de la capa de pintura aplicada, el límite inferior de capa es cero, y no puede ser negativo. Lo mismo ocurre con un proceso que implique tiempos de espera, pues no pueden reportarse tiempos de espera negativos. O, al contrario de lo que ocurre con la fabricación de ejes, cuando pueden haber oscilaciones hacia arriba y hacia debajo de la media considerada como ideal, al tratarse de practicar agujeros pueden haber variaciones hacia arriba, con diámetros mayores a la media (ocasionados, por ejemplo, por desbalanceo en el cabezal del taladro), pero no hacia abajo debido a que el diámetro mismo de una broca nueva está dado por normalización y marca una barrera inferior.

En la Figura 32 se puede ver el histograma de datos de espesores de capa de pintura aplicada a aproximadamente 130 piezas metálicas. El proceso presenta una barrera a la izquierda, definida por el espesor igual a cero. En esas condiciones, es evidente que no existe

una distribución normal a la cual aplicar los cálculos de la métrica y de las herramientas estadísticas usadas por Seis Sigma; por ejemplo para estimar el nivel DPMO, para calcular la capacidad, para definir los límites de las cartas de control del proceso o para realizar pruebas de hipótesis.

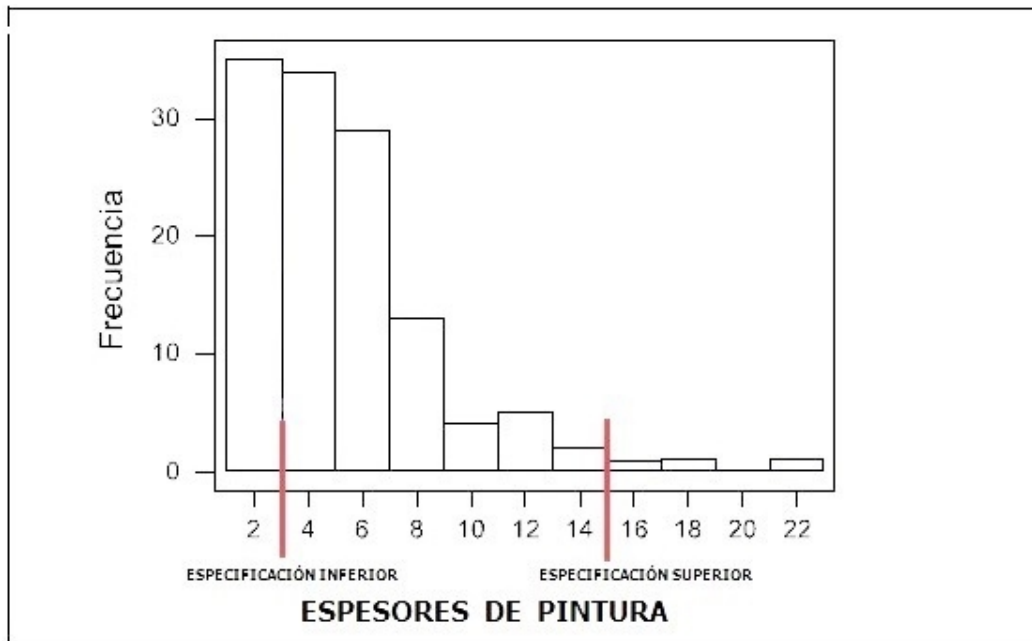


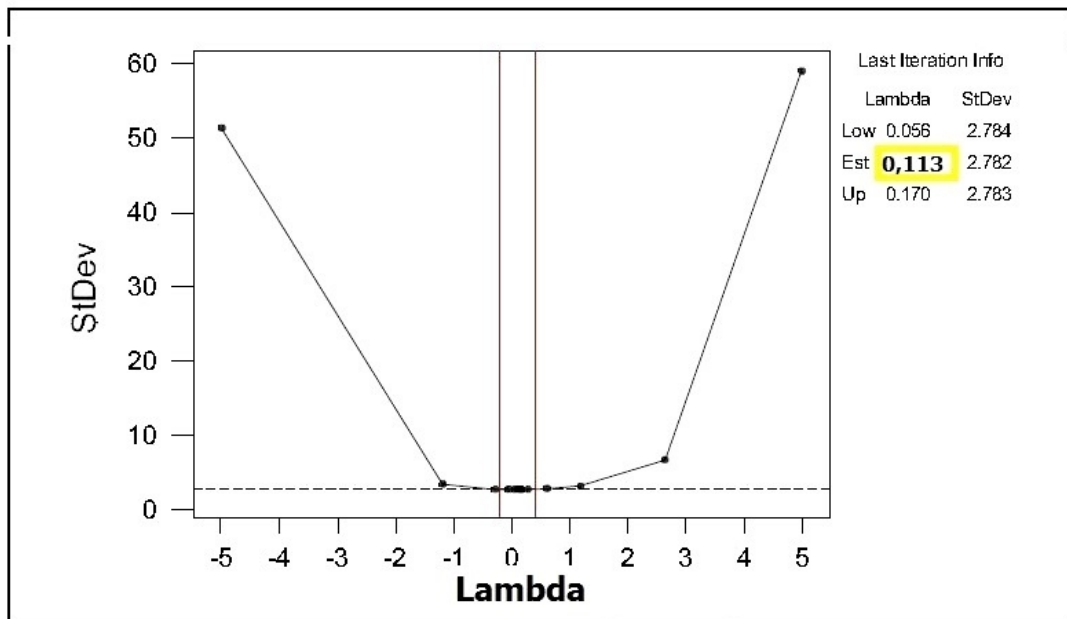
Figura 32: Histograma de datos no normales asimétricos

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El Teorema del Límite Central permite normalizar los datos provenientes de cualquier base, con cualquier distribución. No existe razón para no poder normalizar la distribución de la Figura 32. Los promedios obtienen una distribución normal, pero existe otro método, conocido como BOX-COX, que permite encontrar la mejor aproximación a una distribución normal. Este método se encuentra en cualquier paquete informático estadístico disponible, como el MINITAB.

BOX-COX es el método más eficaz de normalización existente. Siguiendo fielmente un aforismo de su creador George Box (“todos los modelos son falsos, sólo que algunos son útiles”), este es un modelo realmente útil a la hora de procesar datos como los que presenta la Figura 32. La idea central es que en la función matemática que permite transformar datos no normales

en datos normales interviene una constante llamada lambda, λ . Esta constante puede ser mejorada hasta que se encuentra la función que permite la mejor transformación posible para toda la serie de datos. En la Figura 33 puede verse una gráfica típica del MINITAB cuando ha hallado el mejor valor de λ para la función BOX-COX en el problema que estamos analizando.



**Figura 33: Gráfica de Box-Cox para datos de espesores
Utilizando un 95% de confianza**

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

BOX-COX indica que el mejor valor de λ para hacer la transformación de los datos no normales es 0,113. Los programas informáticos disponibles realizan la transformación de los datos, y es con estos últimos con los que se deben realizar todos los cálculos propios de Seis Sigma. Una vez transformados, los nuevos datos tienen un histograma que sigue bastante bien la campana de Gauss, como se ve en la Figura 34.

En el eje X pueden verse los espesores en milímetros transformados, y por supuesto también las Especificaciones Superior e Inferior. Debe tenerse presente que, con la transformación, cambian todas las características estadísticas como Media, Desviación Estándar

y hasta el Coeficiente de Variación ($CV = S / \bar{X}$). Incluso se puede comprobar que en la distribución inicial de la Figura 32 aproximadamente 40 datos están fuera de los Límites de Especificación Superior e Inferior, mientras que en la Figura 34, el número de datos fuera de

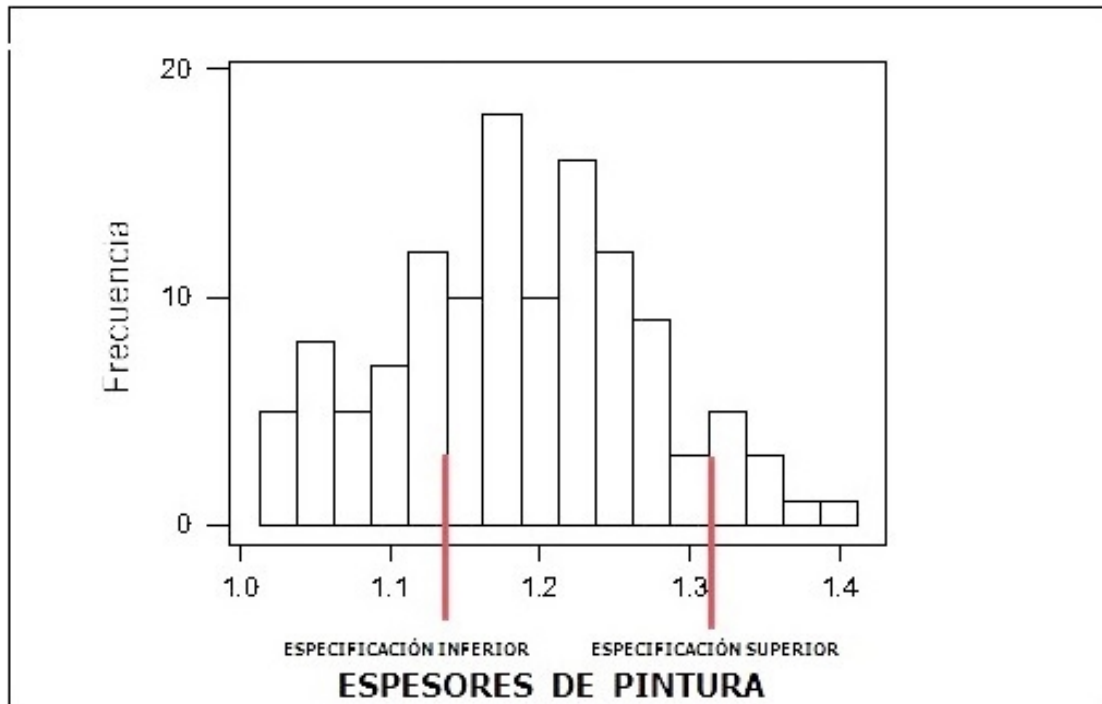


Figura 34: Histograma de datos normalizados

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

especificación ha subido a cerca de 46. En definitiva, se trata de otra serie de datos, completamente diferente. Por eso, todos los parámetros estadísticos usados por Seis Sigma deben trabajarse con los nuevos datos, empezando por el nivel DPMO y el nivel Seis Sigma de desempeño del proceso.

Existen métodos para calificar qué tan bien se acerca a la normalidad una serie de datos cualquiera. Estos métodos son de uso habitual en los paquetes informáticos estadísticos (Ver Figura 35). De hecho, el MINITAB ofrece tres métodos diferentes para evaluar el nivel de normalidad de los datos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner (Shapiro-Wilk) y Kolmogorov-Smirnov.

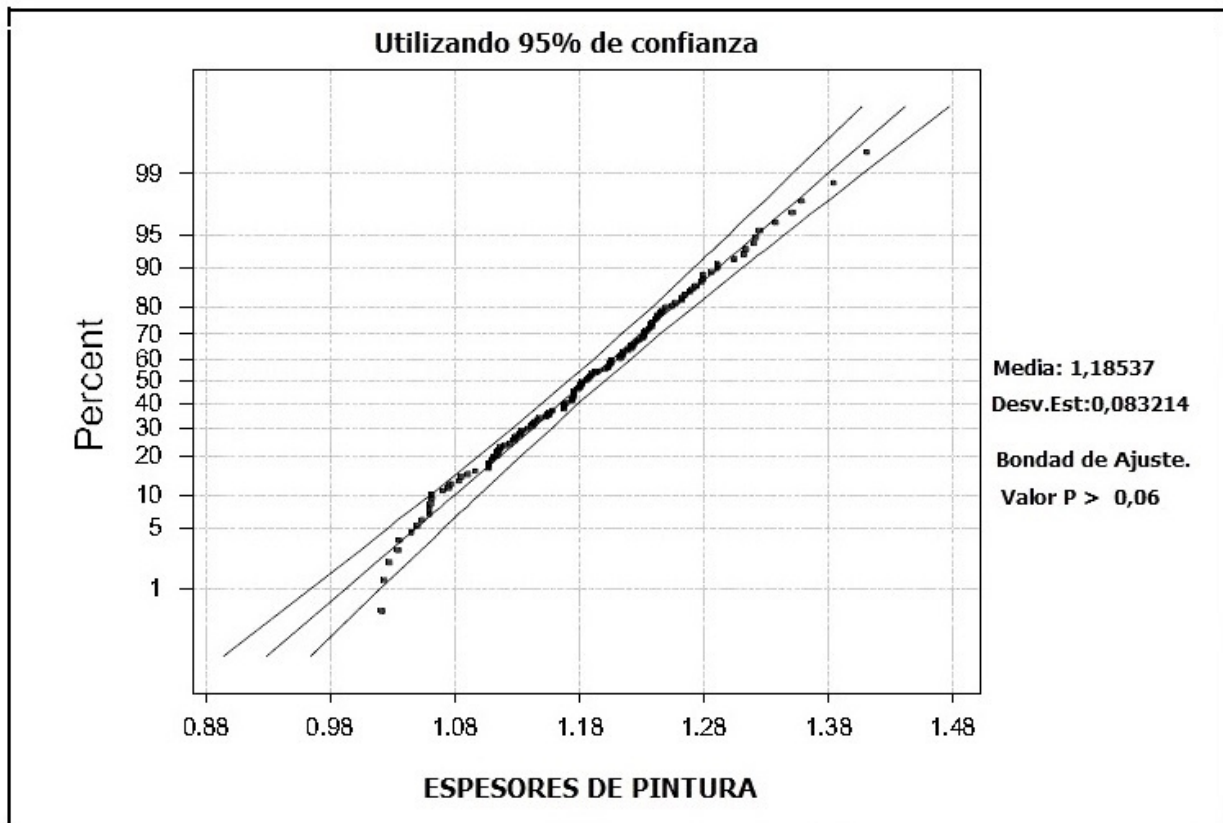


Figura 35: Calificación de normalidad de datos transformados
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Todos los métodos dan resultados similares, aunque es bueno probar cuál de ellos proporciona la mejor transformación para la serie de datos que se analiza en particular. Estas pruebas de normalidad también entregan la media, la desviación estándar y **el valor de p**, que debe ser **mayor que 0,05** si se trata de un buen ajuste a la distribución normal. Una evaluación visual consiste en que la nube de datos se ajuste aproximadamente bien a una línea recta. Son los valores de media y desviación estándar que se ven en la Figura 35 los que deben utilizar a lo largo del desarrollo de la metodología Seis Sigma.

Si es que no se dispone de un paquete estadístico que realice las pruebas de normalidad, entonces se puede realizar manualmente la prueba que usa el Sesgo (Coeficiente de Asimetría) y la Curtosis con las fórmulas que pueden verse en el ANEXO 9, o usando el Excel en

la serie de opciones FÓRMULAS >>> MÁS FUNCIONES >>> ESTADÍSTICAS. A este método se le llama el “método de momentos”.

Si una distribución de datos cuantitativos continuos se asemeja a una distribución normal, su simetría (sesgo) y aplanamiento (curtosis) deben corresponder a los de una típica campana de Gauss. Para ello, tanto el sesgo como la curtosis deben aproximarse lo más posible a cero.

Si no se cumple alguna de las dos condiciones, la serie de datos no corresponde a una distribución normal, y por tanto no pueden usarse para describirla estadísticamente el promedio y la desviación estándar, sino que se deberán usar la mediana y los percentiles. Si una serie no normal proviene de un proceso de transformación, se la deberá normalizar antes de utilizar sobre ella las herramientas de Seis Sigma.

3.1.7. TAMAÑO DE LA MUESTRA

La determinación del tamaño de la muestra es un aspecto relevante a la hora de recoger los datos de los elementos que salen de un proceso, o de los elementos de una población estable en el corto plazo. La confiabilidad de las inferencias que se hagan desde los resultados muestrales hacia la población entera depende en alto grado de que dicha muestra sea suficiente, representativa y aleatoria.

Los muestreos de procesos tratan de obtener datos de una corriente de elementos que se mueven y varían en el tiempo (es indiferente si se trata de bienes o servicios). Esta situación es básicamente diferente a la situación en la cual los datos proceden de una población estática, y no cambian en el corto plazo. Para cualquiera de esos casos, existen métodos de determinación del tamaño muestral, algunos basados en fórmulas estadísticas y otros, más bien empíricos sustentados por la experiencia, que se presentan usualmente en forma de gráficos o tablas.

3.1.7.1. Muestreo de Procesos

En lo que se refiere a Seis Sigma, en la mayoría de ocasiones, se debe hallar el tamaño adecuado de muestra cuando se **Muestrea un Proceso**, es decir cuando hay un “flujo de elementos” que se mueven, saliendo del proceso. No se han desarrollado fórmulas como las referidas a poblaciones estáticas, y, entonces, se pueden usar ayudas como las que se ven en los Figuras 36 y 37, donde se ven tablas que indican el **tamaño n** de la muestra a estudiar, tomando como variable independiente la cantidad de piezas procesadas al día, o a la semana.

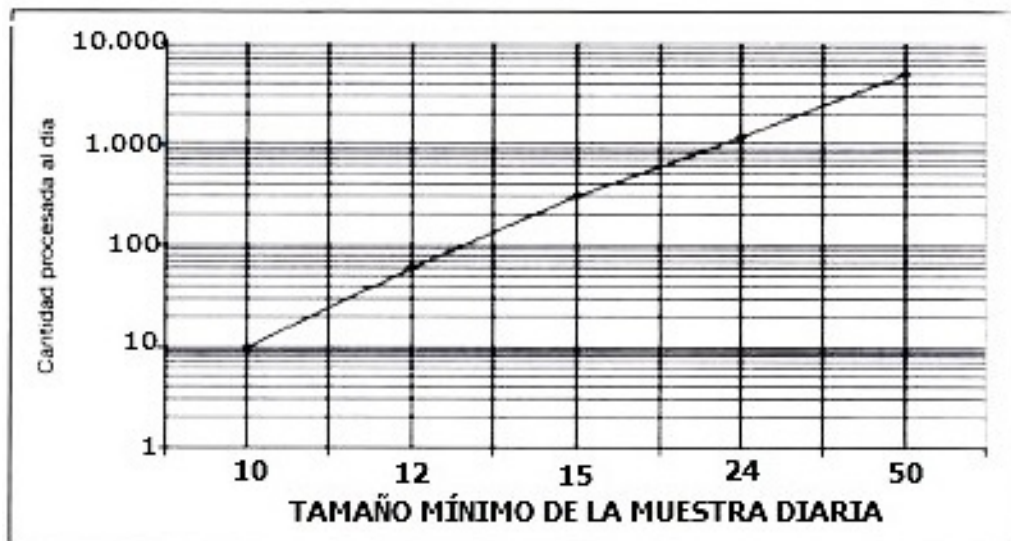


Figura 36: Tamaño de muestra para medición diaria de salidas de proceso

Fuente: Pande, P. Neuman, R. y Cavanagh, R. (2004). Las Claves prácticas de Seis Sigma. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana

En la Figura 36 se presupone que se ha establecido como meta tomar una muestra al día. Así, si el proceso productivo generara 1.000 salidas al día, entonces se deberán tomar como mínimo 24 elementos cada vez y a ellos realizarles las mediciones que se estimen convenientes. Podría tratarse también de la atención en ventanilla a 1.000 clientes diarios, y en ese caso se debería aplicar el cuestionario o la entrevista en particular a 24 de ellos cada día.

El por qué se decidió tomar una muestra diaria depende de otros temas, relacionados con los Métodos de Obtención de Datos que se describen más adelante, con las características

propias del proceso a medir, y sobre todo esa decisión está relacionada con la experiencia del técnico entrenado en Control Estadístico de Procesos.

Está también presente el aspecto relacionado con los subgrupos racionales. Debe tenerse siempre presente que los elementos de las diferentes muestras deben proceder de procesos operando en condiciones aproximadamente idénticas, que es preferible que las unidades sean consecutivas en su salida del proceso, y que el proceso no implique el apareamiento de factores de sesgo cíclico, como por ejemplo tomar las muestras de un proceso productivo siempre después del desayuno, cuando los trabajadores están todavía despabilándose; o realizar encuestas a los últimos clientes de la tarde, que probablemente están cansados y de mal humor, viendo todo bajo la lente del pesimismo. Tampoco debe tomarse muestras cuando “nos parece que menos se afecta al proceso productivo”, o cuando “es más fácil porque hay una persona libre para hacerlo”. Todos esos tipos de decisiones implican un muestreo sesgado, no aleatorio y no representativo.

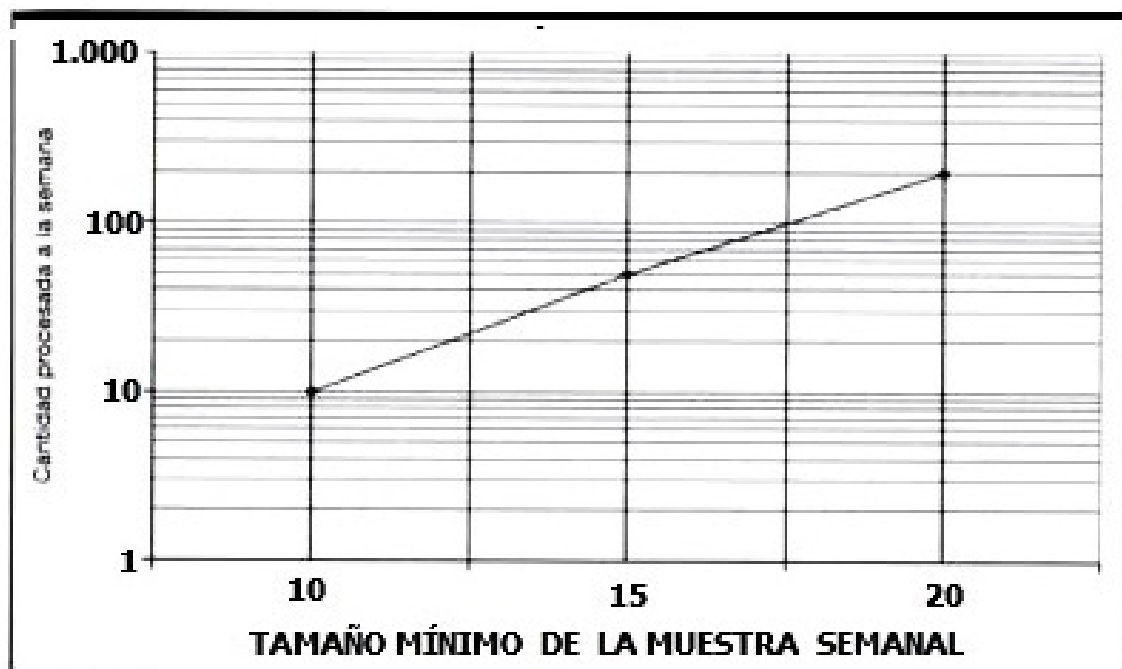


Figura 37: Tamaño de muestra para medición semanal de salida de proceso

Fuente: Pande, P. Neuman, R. y Cavanagh, R. (2004). *Las Claves prácticas de Six Sigma*. Madrid: McGraw-Hill

En la Figura 37 se establece el tamaño mínimo de la muestra, cuando ésta es semanal.

Aparte de tablas parecidas a las indicadas en esas dos Figuras, no existen fórmulas para calcular el tamaño de la muestra cuando se trabaja con procesos, a los cuales hay que calcularles capacidades, niveles sigma o dibujarles gráficos de control estadístico, a lo más se ha indicado que se puede utilizar la Fórmula 11, para poblaciones infinitas. Por el momento, parecería que no hay suficiente sustento para tal afirmación.

Se ha insistido también en que más importante que el tamaño es lograr subgrupos racionales, y es de acuerdo general que un tamaño muestral de 30-50 unidades es el mínimo requerido para asegurar confiabilidad de las medias, y que si se requiere asegurar confiabilidad de las desviaciones estándar, entonces se debe pensar en tamaños de muestra de al menos 100 unidades. Pero son números empíricos, mencionados en los textos, y recomendados por expertos en la medición de procesos.

Otra situación de muestreo de procesos en la cual se debe considerar con cuidado el tamaño de la muestra se presenta en los “Estudios de Capacidad”. En este caso, es necesario tomar datos durante un período de tiempo razonable, a fin de asegurar un cálculo apropiado del desempeño del proceso que se desea analizar. El período de toma de muestra tiene que ver con la velocidad del proceso: si se trata de un proceso masivo que produce muchas salidas (bienes o servicios) por día, entonces se debe considerar un período de cuatro a diez días, y cada cierto tiempo (determinado de manera aleatoria) se toma una pequeña cantidad de elementos de salida, hasta completar una muestra de 120 a 150 productos. Si se trata de un proceso lento, que produce pocas salidas por día, entonces es necesario ampliar el período de estudio hasta completar una muestra de al menos 50 o 60 productos. En todo caso, siempre que se disponga de mayor tiempo y de más elementos de los cuales extraer datos, entonces será factible un mejor conocimiento de la capacidad del proceso.

En el mismo ámbito de los procesos, cuando se trata de construir un histograma, a fin de analizar la distribución de frecuencia de los resultados obtenidos como salida de un proceso cualquiera, se debe contar con un número suficiente de datos, de preferencia más de 100 ⁷⁵.

Como se ve, en todos los casos de muestreo de procesos el procedimiento de cálculo es empírico, producto de la experiencia, caracterizado por la ausencia de fórmulas, y que no debe confundirse con los procedimientos de muestreo de Poblaciones Estáticas Finitas o Infinitas.

3.1.7.2. Muestreo de Poblaciones Estáticas Finitas

En ocasiones hay que **Muestrear una Población** estática. En el ANEXO 10 puede verse un ejemplo de Muestreo de Población y Muestreo de Proceso, con sus diferencias cuando se trabaja con elementos similares.

En los estudios de mercado, por ejemplo, se trata sobre todo con poblaciones estáticas, con “piscinas finitas de datos” de las cuales extraer muestras representativas, es decir porciones de elementos que tomados de cualquier sitio de la piscina representen adecuadamente al resto del universo. Las personas que tratan con mercadeo usualmente no están entrenadas en el uso de fórmulas estadísticas y se mueven más que nada a lo largo de tablas que les facilitan encontrar los **tamaños n** adecuados para sus trabajos. En la Tabla 15 se puede ver un cuadro donde las variables de entrada para obtener **n** son el tamaño de la población (N, finito) que debe conocerse, el MARGEN DE ERROR, ERROR ACEPTADO, o simplemente ERROR: E (qué equivale al grado de seguridad con que la muestra representa a la población), o el INTERVALO o NIVEL DE CONFIANZA (que es la probabilidad de que se repitan los mismos resultados al medir diferentes muestras). Aquí se conoce el tamaño de la población y se precisa un grado de error aceptado, o un intervalo de confianza deseado, pero no estos dos factores al mismo tiempo (como sería lo adecuado). Tampoco se toma en cuenta la varianza de la población.

⁷⁵ Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control estadístico de la Calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

Tabla 15:
Cálculo aproximado del tamaño de una muestra

Población	Margen de error			Intervalo de confianza		
	10 %	5 %	1 %	90 %	95 %	99 %
100	50	80	99	74	80	88
500	81	218	476	176	218	286
1,000	88	278	906	215	278	400
10,000	96	370	4,900	264	370	623
100,000	96	383	8,763	270	383	660
+ 1,000,000	97	384	9,513	271	384	664

Fuente: <http://www.upcomillas.es/personal/peter/investigacion/Tama%F1omuestra.pdf>

Si quien hace el estudio quiere una muestra representativa de una población de 10.000 elementos, y para él es aceptable un grado de error del 10%, se debe tomar una muestra de 96 elementos. Son números aproximados, pero que han demostrado funcionar. Nuevamente debe mencionarse, que el cómo escoger esos 96 elementos tiene que ver con los Métodos de Muestreo que se ven más adelante.

Los tamaños n dependientes del Margen de Error de la Tabla 15 se han calculado a partir de la Fórmula 6, que es una simplificación de la Fórmula 7 (esta fórmula es una consecuencia de la matemática del error muestral, como se verá más adelante), considerando $\sigma^2 = 0,25$ y un intervalo de confianza del 95%. Los otros tamaños n , dependientes del Intervalo de Confianza, se han calculado por medio de la Fórmula 9, con un nivel de Error aceptable del 5%. Como se verá más adelante, esta fórmula es útil cuando es imposible contar con la desviación estándar de la población.

Fórmula 6

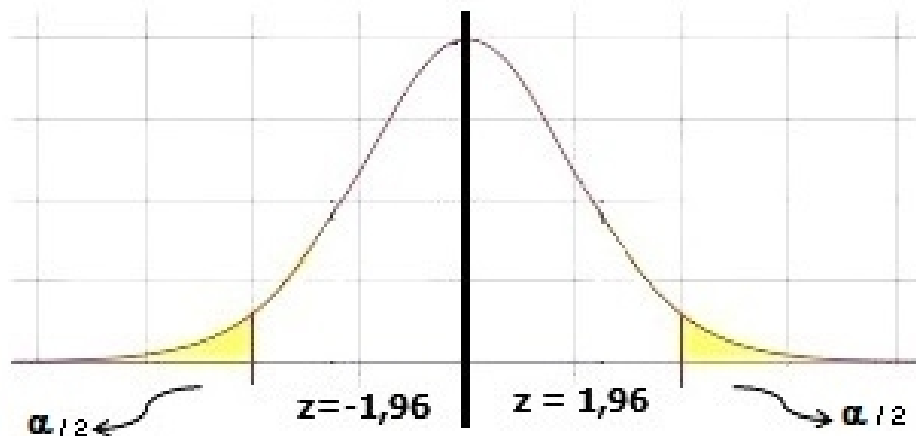
$$n = \frac{N}{1 + N * E^2}$$

Fórmula 7

$$n = \frac{N}{E^2 * (N-1) + \frac{Z^2 * \sigma^2}{1}}$$

En la Fórmula 7 se considera la desviación estándar al cuadrado, que puede estimarse de manera aproximada tomando una muestra piloto de al menos 30 elementos. Puede también conocerse a partir de estudios anteriores o similares. Están, además, el ERROR ACEPTADO (E) y Z correspondiente al INTERVALO o NIVEL DE CONFIANZA deseado. En la industria se toma como un estándar el intervalo de confianza del 95% (que equivale a un ERROR ACEPTADO $\alpha = 0,05$). En la distribución Normal y en la distribución t el intervalo de confianza está centrado alrededor de la media, y por tanto con un valor Z a derecha e izquierda de 1,96 (Ver Figura 38).

En todas los modelos de distribución utilizados por Seis Sigma, el intervalo o nivel de confianza corresponde al área $(1 - \alpha)$.

**Figura 38: Intervalo de confianza del 95%**

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Cuando se trata de poblaciones en las cuales se investiga inferencia de PROPORCIONES del tipo p=si, q=no, entonces, la Fórmula 7 toma la forma de la Fórmula 8. Esta transformación

ocurre porque, en el límite, la distribución Binomial se aproxima a la distribución Normal (Ver ANEXO 11) y, en ese momento, $\mu = n.p$ y $\sigma^2 = n.p.q$.

Fórmula 8

$$n = \frac{N}{1 + \frac{E^2(N-1)}{Z^2 pq}}$$

En esta fórmula la varianza equivale a la multiplicación de las proporciones p y q. Z sale de la distribución normal para el intervalo de confianza deseado. Cuando se desea un elevado grado de seguridad, se toma la mayor varianza posible, que ocurre cuando p = q = 0,5. Entonces, aparece la Fórmula 9.

Fórmula 9

$$n = \frac{N}{1 + \frac{E^2(N-1)}{0,25 * Z^2}}$$

En base a la Fórmula 9, se han construido cuadros como el que se presenta en la Tabla 16. En ese cuadro pueden verse tamaños muestrales para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, lo normal en la industria. Puede verse además que, naturalmente, si se desea un error menor respecto de los parámetros poblacionales deben tomarse muestras de mayor tamaño. Y también puede verse que para tamaños grandes de N (algunos autores sugieren que a partir de N = 50.000) prácticamente el tamaño de la muestra ya no cambia. En este trabajo se sugiere que para **N > 50.000** se puede considerar a la población como de tamaño infinito.

Tabla 16:Tamaños de muestra, conocidos N, E y α

<i>Tamaño de la población</i>	<i>nivel de confianza</i> $\alpha = .05 (z = 1.96)$	
	para E = .05	para E = .03
N = 100	n = 80	n = 92
N = 150	n = 108	n = 132
N = 200	n = 132	n = 169
N = 250	n = 152	n = 203
N = 500	n = 217	n = 341
N = 1.000	n = 278	n = 516
N = 2.500	n = 333	n = 748
N = 5.000	n = 357	n = 879
N = 10.000	n = 370	n = 964
N = 100.000	n = 383	n = 1056
N = 1.000.000	n = 384	n = 1066
N = 2.000.000	n = 384	n = 1066

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En la Tabla 17 se han definido tamaños de población pequeños ($N \leq 40$) y puede verse que, para $\alpha = 0.05$, los errores $E = 0,05$ y $E = 0,03$ (normales para trabajar en la industria) conducen al cálculo de tamaños de muestras prácticamente iguales al tamaño de la población. Es por eso que para poblaciones muy pequeñas se sugiere tomar como muestra a todos los elementos de la misma, o con $n = N-1$. Desde $N < 15$ se sugiere tomar obligatoriamente a todos los elementos de la población.

Tabla 17:

Tamaños muestrales para poblaciones pequeñas

($\alpha = 0.05$)

<i>Tamaño de la población</i>	<i>error tolerado</i>		<i>Tamaño de la población</i>	<i>error tolerado</i>	
	E = .05	E = .03		E = .05	E = .03
40	36	38	32	30	31
39	35	38	31	29	30
38	35	37	30	28	29
37	34	36	29	27	28
36	33	35	28	26	27
35	32	34	27	25	26
34	31	33	26	24	25
33	30	32	25	24	24

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Nota: En alguna literatura se menciona que es necesario hacer una comprobación adicional cuando se utilizan las fórmulas anteriores. Debe comprobarse que $N > n(n-1)$, o que $N > n$. Si es que una de estas condiciones no se cumplen, entonces hay que realizar el ajuste siguiente:

$$n_2 = \frac{n}{1 + \frac{n}{N}}$$

Las dos comprobaciones son innecesarias. La primera porque la condición $N > n(n-1)$ sólo se cumple a partir de un tamaño de población N igual a aproximadamente 145.000, cuando estamos hablando de poblaciones infinitas en la práctica. Eso significa que todas las fórmulas para población finita deberían sin excepción corregirse, lo cual no tiene sentido.

La segunda comprobación es más absurda todavía porque un análisis de todas las fórmulas anteriores demuestra que siempre $N > n$, haciendo la comprobación irrelevante.

En realidad se trata de un tipo de factor corrección de n cuando se trabaja con poblaciones finitas ($n < 50.000$). En este trabajo no se utiliza este corrector.

3.1.7.3. Muestreo de Poblaciones Estáticas Infinitas

Para poblaciones grandes, a partir de $N = 50.000$, en las Fórmulas 7, 8 y 9 la incidencia del factor N pierde peso, pues tiende a infinito y se simplifica en el numerador y en el denominador. El resultado es que quedan las siguientes fórmulas simplificadas:

Fórmula 10

$$n = \frac{z^2 pq}{E^2}$$

Fórmula 11

$$n = \frac{z^2 \sigma^2}{E^2}$$

Considerando que frecuentemente se trabaja con un intervalo de confianza del 95,5%, cuando $Z=2$, la Fórmula 11 puede transformarse en la expresión de la Fórmula 12, que puede deducirse también a través de la distribución t para los intervalos de confianza de la media⁷⁶.

Fórmula 12

$$n = \frac{4 * \sigma^2}{E^2}$$

Si no se conoce σ^2 , entonces se puede utilizar la posibilidad de la mayor varianza posible, dada por $\sigma^2 = p.q = 0,5 \times 0,5 = 0,25$. Y se tendría la Fórmula 13.

Fórmula 13

$$n = \frac{0,25 * Z^2}{E^2}$$

Si se puede estimar la varianza de la población, a partir de estudios previos o similares, se usa σ^2 , de lo contrario debe usarse S^2 , hallado a partir de una muestra piloto de la población. Si es que es imposible hallar σ^2 o S^2 , entonces debe usarse un intervalo de confianza del 95,5%, cuando $Z=2$, por lo que la Fórmula 12 se simplifica así:

Fórmula 14

$$n = \frac{1}{E^2}$$

Las fórmulas resumidas previamente tienen un uso discrecional, es decir que éste depende del criterio del investigador. De lo que se trata es de proporcionarle suficientes

⁷⁶ Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control estadístico de la Calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

opciones que faciliten su trabajo. Incluso existen páginas en la WEB que facilitan la obtención de los tamaños muestrales, tales como: http://www.macorr.com/ss_calculator.htm ó <http://www.raosoft.com/samplesize.html> . Los valores obtenidos por uno u otro camino pueden ser diferentes, pero de lo que se debe tener cuidado es de no distorsionar tanto el valor de n que perjudiquen la representatividad o la aleatoriedad de la muestra.

3.1.7.4. Recomendaciones respecto del Margen de Error (E)

En todas las Fórmulas referidas al tamaño de la muestra, desde la Fórmula 6 hasta la Fórmula 14, se deben tomar en cuenta algunas consideraciones, a fin de que los cálculos sean consistentes, en términos dimensionales:

1. Por definición, N y n son adimensionales, Z es adimensional, p y q son adimensionales, todo porcentaje es adimensional.
2. La desviación estándar σ tiene la dimensión [UNIDADES], por lo que la Varianza σ^2 tiene la dimensión [UNIDADES²]. [UNIDADES] de la característica investigada en la población: peso, longitud, temperatura, número de defectuosos, dureza, etc.
3. Lo anterior significa que en las fórmulas **que no tienen σ** entre sus variables el error debe estar expresado como **porcentaje**.
4. Y en cualquier fórmula que tenga σ o σ^2 entre sus variables, el error E debe expresarse en [UNIDADES], y E^2 en [UNIDADES²]. E en [UNIDADES] puede ser el porcentaje de error tolerado o aceptado por el investigador, pero aplicado a la media de la característica que se investiga en la población. Si se conoce σ de la población, evidentemente se debe conocer la media también, de manera que no es un problema transformar E [%] en E [UNIDADES].

3.1.7.5. Recomendaciones respecto del Tamaño “n” de la Muestra

1.- No sólo se necesita que el tamaño de la muestra sea el adecuado para respaldar las inferencias muestra-población. Además, la muestra debe ser representativa, lo que implica no sesgo, igual de oportunidad de todos los elementos de ser elegidos y representatividad de toda la población.

2.- Una muestra que tenga un tamaño mayor al que conducen las fórmulas expuestas no es necesariamente mejor, ni garantiza un menor margen de error. Una muestra muy grande puede conllevar riesgos de sesgo precisamente por su tamaño. Por eso es que si aparece una muestra de este tipo, es mejor subdividirla en estratos o por cuotas (Ver Procedimientos de Muestreo Aleatorio y No Aleatorio, más adelante). En la creación de submuestras, estratos o cuotas hay que tener cuidado que dichos subgrupos aporten a la muestra total en la proporción que les corresponde.

3.- Todas las fórmulas han sido deducidas a partir de la distribución normal, pero en virtud del Teorema del Límite Central, y si es que $N \geq 30$, se pueden aplicar a cualquier población, aunque ellas no sigan una distribución normal. Si alguna fórmula tiene entre sus variables a σ , es importante obtenerla aunque sea de una muestra piloto. Se trataría del estimador S , pero sirve.

4.- Si $N \geq 30$, y al calcular n sale menor que 30, pero se sabe que procede de una población normal y se conoce con certeza σ , dejar ese $n < 30$.

5.- Si $N \geq 30$, y al calcular n sale menor que 30 y se sabe que procede de una población normal, pero no se conoce con certeza σ , o se duda de una estimación por muestra piloto, es mejor aproximar n a 30.

6.- Si $N < 30$, aunque se trate de una población normal, se recomienda trabajar con toda la población y no extraer una muestra.

7.- Si $N \geq 30$, se trata de una población que no sigue una distribución normal, y al calcular n sale menor que 30, se recomienda aproximar n a 30.

8.- Toda muestra con n fraccionario debe aproximarlos hacia arriba.

3.1.8. OBTENCIÓN DE LOS DATOS

Cuando se trata de obtener los datos destinados al análisis estadístico, un aspecto a resolver adecuadamente es la determinación del tamaño n de la muestra. El otro aspecto, una vez determinado el tamaño de la muestra, es la manera de elegir los n elementos que conforman la muestra.

3.1.8.1. Tipos de Muestras

1.- MUESTRAS ALEATORIAS O PROBABILÍSTICAS.- Son aquellas en la cual todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser escogidos. Se conocen también como Muestras Científicas, y son las que mejor aseguran que las inferencias realizadas desde la muestra hacia la población sean confiables. Las principales características de las Muestras Aleatorias radican en que no están sesgadas y que son representativas. Existen cuatro procedimientos que garantizan la obtención de una Muestra Aleatoria:

- **Muestreo Aleatorio Simple.**- Los ejemplos más simples de este tipo de muestreo son el sorteo, la lotería, el lanzamiento de monedas, de dados o la extracción de cartas de un naipe. Todos estos procedimientos tienen en común el azar con que son elegidos los elementos que van a la muestra. Las Tablas de Números Aleatorios o los programas informáticos de generación randómica de números generan también elementos al azar, y sin sesgo. Se calcula primero el

tamaño adecuado de la muestra para el experimento a realizar, y después de completa ese tamaño n utilizando alguno de los mecanismos mencionados.

- **Muestreo Sistemático.**- Se basa en el uso de una lista de todos los elementos de una población. Después de determinar el tamaño de muestra necesario, y por tanto el intervalo de salto para escoger los elementos (N/m), se genera una variable al azar: la posición desde la que empiezan los ciclos de selección de elementos.

- **Muestreo Estratificado.**- Se recomienda para poblaciones grandes, o para aquellas que presentan características internas que exigen, por consistencia, realizar primero una subdivisión de la población. Los subgrupos, estratos o segmentos pueden ser, por ejemplo, la edad o el sexo de las personas, si se trata de realizar estudios relacionados con el peso o las preferencias en cuanto a vestimenta. En un proceso de manufactura, donde la población la constituyen las piezas producidas de cierto tipo, los estratos podrían ser los turnos de producción o las secciones o máquinas que realizan los procesos que entregan esas piezas en particular.

A continuación, dentro de cada estrato se realiza una selección al azar, por cualquiera de los métodos anteriormente citados. Es importante tener presente que el número de elementos que entrega cada estrato debe mantener una relación consistente con el tamaño del estrato en cuestión respecto de la población total.

- **Muestreo por Conglomerados.**- Se aplica también para poblaciones grandes. En este caso, se trata de aprovechar la presencia de divisiones naturales pre-existentes al interior de la población. Por ejemplo, si se trata de realizar una encuesta de consumo a nivel nacional, los conglomerados pre-existentes son las regiones, provincias o ciudades; si se quiere realizar una investigación de ingresos, los conglomerados a utilizar pueden ser las empresas de la región en que se realiza el estudio; o si se realiza una encuesta a nivel de ciudad, los conglomerados naturales pueden ser los barrios.

Una vez seleccionados los conglomerados, todos ellos son sometidos a un muestreo aleatorio, y finalmente todos los elementos de los conglomerados escogidos pasan a ser parte de la muestra.

2.- MUESTRAS NO ALEATORIAS o NO PROBABILÍSTICAS.- Al contrario del primer grupo de muestras, éstas no garantizan ni imparcialidad ni representatividad, pero a veces resulta inevitable o conveniente utilizarlas, por cuestiones económicas, de tiempo disponible o de necesidad particular del estudio a realizar. Algunos tipos de Muestras no Aleatorias se obtienen con los siguientes procedimientos:

- **Muestreo por Cuotas (subgrupos racionales).**- De especial interés para la metodología Seis Sigma, pues se aplica sobre todo a procesos continuos de producción o de prestación de servicios, consiste en tomar una muestra cada cierto tiempo y medirla. Las consideraciones para que este tipo de muestreo garantice una buena extrapolación de los datos a toda la población se expusieron en el apartado referido a los subgrupos racionales. Las cartas de control requieren de la toma de datos por medio de subgrupos racionales.

- **Muestreo Opinático o Discrecional.**- Es aquel en que una persona con autoridad elige los elementos que han de formar parte de la muestra. Los criterios utilizados son personales y pueden o no tener un sustento técnico. Es lo que ocurre cuando un policía en una redada decide a qué vehículos parar para solicitarle los documentos al conductor.

- **Muestreo por Conveniencia.**- Se trata de trabajar con la muestra que se tiene disponible en ese momento, o con aquellos datos u observaciones que son fáciles (o convenientes económicamente) de obtener. Por ejemplo, si se trata de registrar los datos meteorológicos de una región, posiblemente sea sólo posible tomarlos en un laboratorio o en un observatorio que cuente con los instrumentos adecuados para realizar las mediciones, aunque ese sitio en particular no esté rodeado de un ambiente precisamente representativo de toda la región.

- **Muestreo Bola de Nieve.**- Utilizado en las encuestas, empieza eligiendo en forma aleatoria una muestra, y después de entrevistar a las personas así elegidas se les pide que identifiquen a otras personas que pertenezcan a la misma población y que tengan la “misma meta de interés”, a fin de entrevistarlos también. La muestra resultante no es probabilística, pero permite detectar características raras o deseables de identificar en una población.

3.1.8.2. Métodos de Recolección de Datos

Finalmente, después de calcular el tamaño de la muestra y de determinar el tipo de muestreo a utilizar, se debe elegir el método mismo de recolección de datos. Existen tres métodos:

1.- OBSERVACIÓN DIRECTA.- El recolector anota lo que ve. No manipula variables ni hace preguntas. Sólo registra los datos que proceden del fenómeno observado.

2.- EXPERIMENTO ESTADÍSTICO.- El recolector de datos varía factores que afectan a las variables de salida que estudia, y anota los resultados.

3.- ENCUESTA ESTADÍSTICA.- Utiliza personas que aplican entrevistas personales o telefónicas, o mediante formularios impresos.

3.2. CONCEPTOS ESTADÍSTICOS RELEVANTES PARA SEIS SIGMA

Cuando en este trabajo se revisan algunos temas de la Estadística, se lo hace procurando relieves la comprensión conceptual de los mismos, debido a que son temas fundamentales para la correcta aplicación de las herramientas estadísticas a la metodología Seis Sigma. No es este un texto de estadística, pero sí considera que existen ciertos detalles técnicos que, en general, ocasionan dificultades de comprensión a quienes se entrenan en el desarrollo del

ciclo DMAIC. Por ello, más que en fórmulas o deducciones, se insistirá en la aplicación práctica de los conceptos, incluso por medio de software, siempre que sea posible.

3.2.1. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD UTILIZADAS POR SEIS SIGMA

En principio, los matemáticos y los estadísticos teóricos desarrollan funciones y fórmulas sin que medie la necesidad de una aplicación práctica inmediata. Así desarrolló Gauss su famosa función, y así se desarrollaron la mayoría de las distribuciones de probabilidad conocidas. Algunas han terminado siendo útiles para explicar el comportamiento probabilístico de variables discretas y de variables continuas en determinados casos prácticos del mundo real y bajo ciertas condiciones específicas.

Una de las excepciones a esta norma es el caso de la distribución Chi Cuadrado, que fue desarrollada por el matemático Karl Pearson cuando se percató de que los científicos que realizaban experimentos con variables aleatorias no sabían en qué grado los resultados de esos experimentos se ajustaban al comportamiento que establecía de antemano algún “modelo teórico ideal” que ellos tenían en mente. Era evidente que había que desarrollar una fórmula matemática que permitiera determinar cuándo la variación de los resultados experimentales obtenidos respecto de los resultados esperados seguía ocurriendo dentro de límites probabilísticamente previstos, y cuándo esas variaciones eran lo **suficientemente significativas** como para asegurar que los resultados ya no correspondían al modelo propuesto. Entonces, Pearson desarrolló la distribución Chi Cuadrado, que es realidad un caso particular de la distribución Gamma. También la distribución t de Student fue desarrollada por Gosset cuando apareció la necesidad de hacer control de calidad contando sólo con muestras pequeñas, mientras trabajaba en una cervecería.

Lo usual es que, en base a los histogramas que se dibujan con los datos salidos de observaciones o experimentos, se seleccionen modelos de distribución de probabilidad y se los pruebe para ver si, efectivamente, ellos predicen los resultados de observaciones y

experimentos futuros, dentro de los rangos de probabilidad propuestos. De esa manera, se encontró por ejemplo que la distribución Binomial predice más o menos bien la probabilidad de ocurrencia de los resultados de los experimentos tipo Bernoulli. Difícilmente se puede vislumbrar, a partir de las complejidades matemáticas implicadas en el desarrollo de las distribuciones teóricas de probabilidad, su futuro uso práctico en el mundo real, social o natural. En el fondo, existe un proceso empírico de prueba y error, hasta encontrar la distribución adecuada para cada tipo de fenómeno que interese estudiar.

Por supuesto que ahora existen sofisticados métodos estadísticos apoyados por la informática que determinan la distribución de probabilidad que más se ajusta a una serie específica de datos recopilados (Normalidad, Chi Cuadrado, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darlin). Es más, se puede encontrar paquetes informáticos, como el Stat::Fit orientados específicamente al trabajo en esta área. Pero la selección de las distribuciones de probabilidad más adecuadas a las series de datos procedentes de los procesos o experimentos más comunes e importantes dentro de las más variadas áreas de la actividad humana se realizó hace ya mucho tiempo. En nuestro ámbito de trabajo, interesa estudiar las distribuciones que permiten realizar inferencias en el área del análisis y la mejora de procesos, es decir aquellas distribuciones relacionadas con la distribución Normal.

3.2.1.1. Distribuciones Discretas relacionadas con la Distribución Normal

En lo que se refiere a variables discretas, las distribuciones Binomial, Hipergeométrica, Geométrica y de Poisson son importantes herramientas para Seis Sigma en las fases de Medición y Análisis. Estas distribuciones se aproximan a la distribución Normal bajo determinadas condiciones (Ver ANEXO 11). Debe notarse que también la distribución Chi Cuadrado es utilizada en ciertos cálculos de probabilidad que implican variables categóricas. L

- La **Distribución Binomial**, para variables tipo “pasa, no pasa”, permite calcular la probabilidad de que se obtenga un número dado de éxitos (k), a partir de un número dado de intentos (n), y de una proporción (p) de éxitos conocida y constante para un proceso o una población dados (Ver ANEXO 11).

Las variables “pasa, no pasa” se consideran cuantitativas discretas. La proporción éxito/fracaso se considera una constante, a partir de la suposición de que la población en la que se desarrollan los experimentos es infinita, dando por resultado en la práctica una serie de experimentos independientes. Se trata, por tanto, de un experimento Bernoulli.

Un experimento Bernoulli tiene las siguientes características:

- Cada ensayo conduce a dos únicos resultados posibles, mutuamente excluyentes, llamados “éxito” el uno y “fracaso” el otro.
- La probabilidad de “éxito” o “fracaso” para cualquier intento permanece fija en el tiempo (la población es lo suficientemente grande como para que la ejecución de los ensayos no alteren la proporción, y se considere que existe reposición).
- Los ensayos sucesivos son estadísticamente independientes, es decir el resultado de un ensayo en particular no es afectado, ni afecta, por el resultado de cualquier otro ensayo.

- La **Distribución Hipergeométrica**, también para variables tipo “pasa, no pasa”, considera poblaciones pequeñas en las que la proporción éxito/fracaso no se mantiene constante. Los experimentos posteriores dependen de los anteriores, pues no hay reposición (por tanto, no se trata de un experimento Bernoulli). Intenta predecir la probabilidad de hallar un número dado de éxitos (x) en una muestra de tamaño n , a partir de la proporción conocida de éxitos (k) en la población total, que es de tamaño N (Ver ANEXO 11).

- La **Distribución Geométrica**, aplicable a ensayos Bernoulli, para poblaciones infinitas en las que la relación éxito/fracaso permanece constante, permite calcular el número de ensayos (x) que es necesario realizar hasta encontrar el primer éxito. En la población se tiene una proporción p de éxitos y una proporción q de fracasos (Ver ANEXO 11).
- La **Distribución de Poisson** considera una tasa λ conocida de ocurrencia de eventos en el tiempo o en el espacio (defectos por metro, fallas por día, clientes por hora) para un proceso dado. En base a ese dato, se trata de predecir la probabilidad de que se presente un número esperado de eventos (x) en esa unidad de tiempo o espacio (Ver ANEXO 11).

Ahora, si bien son importantes herramientas para las fases Medir y Analizar del ciclo DMAIC, debe notarse que se trata de distribuciones de evidente aplicación al control estadístico de la calidad. Pero no es ese el enfoque central de la metodología Seis Sigma, cuya intención no es revisar lo que ya pasó, sino prevenir pro activamente que los defectos no aparezcan en el futuro. Seis Sigma no hace control de calidad, si no que gestiona, asegura y mejora continuamente la calidad; y si es que utiliza intensivamente las gráficas de control es con el propósito de descubrir qué procesos incluyen causas especiales en su desempeño y también para controlar que las acciones de reducción de la variabilidad se mantengan en el tiempo, pero no las utiliza para hacer control estadístico de la calidad, pues no es su objetivo.

En consecuencia, no se dará más espacio al estudio de las distribuciones Binomial, Hipergeométrica, Geométrica y de Poisson, pero sus fórmulas y estadísticos pueden verse en el ANEXO 11. Cualquier duda en particular puede ser resuelta a través de la consulta de textos especializados en el tema. En cambio, sí se profundizará en el estudio de las distribuciones Normal, Chi cuadrado, t de Student y F de Snedecor.

3.2.1.2. Distribuciones Continuas relacionadas con la Distribución Normal

De hecho, estas son las distribuciones que más se utilizan cuando se trabaja con Estimadores Puntuales, Intervalos de Confianza, Pruebas de Hipótesis y Diseño de Experimentos.

Las funciones **Chi cuadrado**, **t** de Student y **F** son distribuciones que frecuentemente aparecen cuando se muestrea, es decir cuando el número de elementos que se revisan es relativamente bajo ($n \leq 30$), por cuestiones de costo, de acceso o de disponibilidad. Cuando las muestras presentan estadísticos que siguen esas distribuciones, su uso es determinante.

Hay que tener presente que **Chi cuadrado**, **t** de Student y **F** son distribuciones derivadas de la distribución normal. Sin entrar en detalles matemáticos, esas distribuciones se originan así:

1.- La Distribución **Chi Cuadrado** (χ^2) es la sumatoria de los cuadrados de **k+1** variables aleatorias independientes que siguen, todas, una distribución normal estandarizada. Tiene **k** grados de libertad, los mismos que se expresan en su función de densidad de probabilidad (Ver ANEXO 12). También la multiplicación de dos distribuciones de Gauss, dan por resultado una función que sigue la distribución Chi Cuadrado. Evidentemente esta función no puede dar resultados $f(x)=\chi^2$ negativos, y como en los histogramas de Chi Cuadrado se encuentra que esta función es la que está en el eje de las abscisas (Ver Figura 46), la gráfica de la distribución va desde 0 a $+\infty$. Por eso la función de densidad de probabilidad de χ^2 es asimétrica con una cola a la derecha.

2.- La Distribución **t** de Student procede de la división de una variable aleatoria con distribución normal estándar para una variable aleatoria con distribución Chi Cuadrado. Si la distribución Chi Cuadrado tiene **k** grados de libertad, la distribución **t** de Student resultante

también tiene k grados de libertad (Ver ANEXO 12). En el gráfico de esta distribución, en el eje de las abscisas, están los valores de x (o los correspondientes t estandarizados), por lo que la función de densidad de probabilidad puede tener dos colas y de hecho es parecida a la distribución Normal, y extenderse en todo el campo de los números reales (Ver Figura 49).

3.- La Distribución F es el cociente entre una variable con distribución Chi cuadrado de m grados de libertad, en el numerador, y otra variable con distribución Chi Cuadrado con n grados de libertad, en el denominador. La distribución F resultante tiene m grados de libertad en el numerador y n grados de libertad en el denominador (Ver ANEXO 12). Tampoco en esta distribución es posible el apareamiento de $f(X)=F$ negativos, y como para dibujar la curva de densidad de probabilidad se ubica la función F como variable independiente en el eje de las abscisas, la curva resultante es asimétrica con una cola a la derecha, igual que ocurre con la distribución χ^2 y el rango de valores F va desde 0 a $+\infty$. Debe notarse que, a diferencia de lo que ocurre con las distribuciones Normal y t, no es la variable x la que tiene la distribución que se ve en la Figura 53, si no la función $f(x)=F$.

En rigor, ese es el origen matemático de las tres distribuciones. A partir de esas definiciones aparecen complejas fórmulas de densidad de probabilidad (Ver ANEXO 12), cuyo detalle exacto no interesa para los objetivos presentes, aunque sí se debe aclarar que las tres funciones de densidad de probabilidad $f(X)$ tienen algunas mismas propiedades, que se cumplen en el intervalo de números reales (x_1, x_2) :

$$1.- f(x) \geq 0$$

Todo valor de la función es positivo, $f(x)$ no es probabilidad, es la frecuencia.

$$2.- \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

El área bajo toda la curva es igual a 1

$$3.- P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx = 1 \quad \text{La probabilidad es igual al área entre } x_1 \text{ y } x_2$$

Es lógico que así sea, si es que las tres distribuciones que se analizan proceden en última instancia de la distribución normal. Pero más allá de esta conclusión está el hecho importante de que las aplicaciones y fórmulas matemáticas de Chi Cuadrado, t de Student y F de Snedecor sólo pueden aplicarse en el ámbito de datos cuantitativos que siguen una distribución normal. Cuando se trata con procesos, no siempre se encuentran distribuciones de datos completamente normales, por lo que primero hay que normalizar esos datos, aprovechando las propiedades del Teorema del Límite Central.

Debe señalarse que Chi Cuadrado, t de Student y F de Snedecor tienen formas de curva que dependen de los grados de libertad del problema en cuestión al que se apliquen las distribuciones. En general, conforme aumentan los grados de libertad, las tres distribuciones aproximan la forma de sus respectivas curvas de probabilidad a la curva normal.

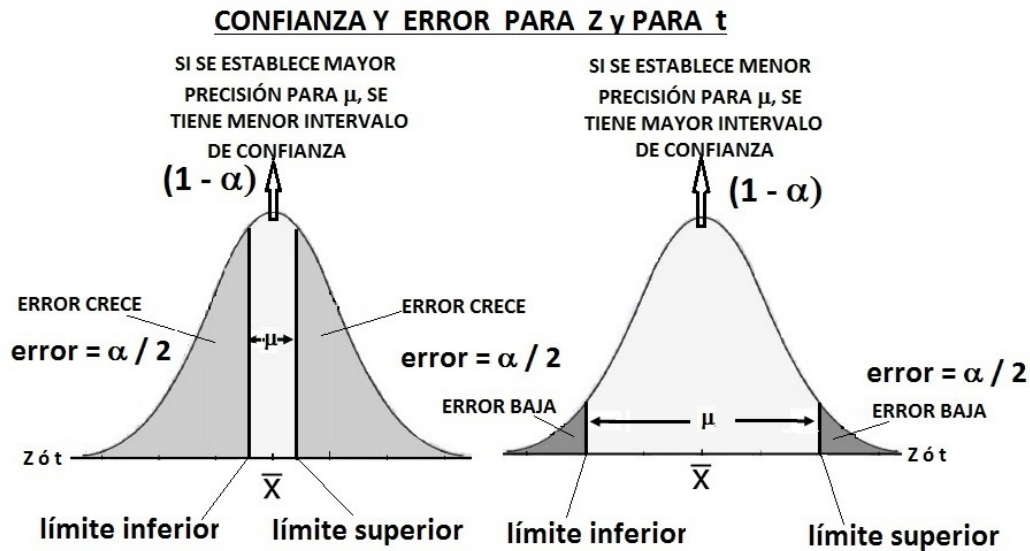
3.2.1.3. Estimadores Puntuales e Intervalos de Confianza

Una característica importante de las cuatro distribuciones continuas que usa Seis Sigma, incluida la Normal, es que pueden trabajar tanto con estimadores puntuales como con intervalos o rangos de confianza, calculados a partir de datos muestrales. Los estimadores puntuales son estadísticos (valores numéricos simples) que permiten “estimar” aproximadamente el parámetro de la población (\bar{X} estima a μ , S estima a σ , S^2 estima a σ^2 y p estima a π). Como es extremadamente improbable que un estimador pueda “estimar” de

manera exacta a su parámetro correspondiente, sólo puede hablarse de intervalos de confianza dentro de los cuales se puede tener una mayor o menor aproximación al valor real del parámetro (para un mismo tamaño de muestra, el pretender contar con una mayor exactitud en la estimación equivale a tener una mayor probabilidad de equivocación).

Todo depende de la exactitud con la que se pretenda acertarle al valor real del parámetro. Si se quiere asumir un conocimiento más exacto de ese valor, hay dos alternativas: la una es tomar muestras de mayor tamaño; la otra (si sólo se cuenta con muestras que no pueden crecer) es arriesgarse a incurrir en un error y equivocarnos.

En el caso de las distribuciones Normal y t de Student, un intervalo de confianza mayor equivale a una menor probabilidad de error a la hora de predecir μ , error que en la Figura 39 se puede ver como dos colas simétricas que están en los extremos izquierdo y derecho de las campanas. Podría ser que el error se encuentre en uno solo de los extremos de la campana, también. El error significa el porcentaje de riesgo que el investigador está dispuesto a admitir respecto de que el valor verdadero del parámetro μ se encuentre realmente fuera del intervalo marcado por el “límite inferior” y el “límite superior” que se ve en la Figura 39. El **error** se simboliza como α . En curvas simétricas puede distribuirse en partes iguales entre las dos colas. Como el área bajo la curva es 1 (100%), el **intervalo de confianza** es igual a $(1-\alpha)$. El error α que se utiliza en los intervalos de confianza no tiene que ver con la significancia α que se define en las Pruebas de Hipótesis.



CONFIANZA Y ERROR PARA CHI CUADRADO y PARA F

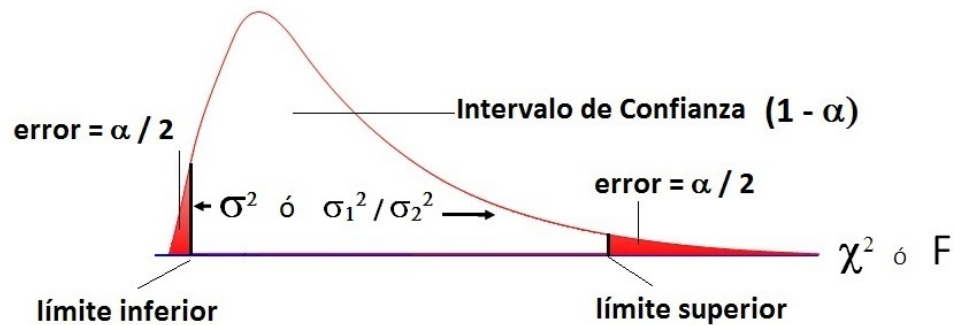


Figura 39: Confianza y Error para Z y t , Chi cuadrado y F.

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El error α representa el riesgo o la incertidumbre que se está dispuesto a aceptar cuando se realiza la inferencia estimador-parámetro. De esta manera, $\alpha=5\%$ por ejemplo, puede interpretarse como el riesgo de que de cada 100 observaciones o experimentos en cinco ocasiones aproximadamente el parámetro se salga, hacia arriba o hacia abajo, de los límites superior e inferior establecidos. En los ámbitos de la administración de empresas, de la producción de bienes y servicios, y en general de los experimentos científicos, se acepta por convención un nivel de riesgo o error del 5% (0.05).

En la Figura 39 puede verse, además, que el mismo principio de incertidumbre se aplica a la distribución χ^2 cuando se estima la varianza σ^2 de la población a partir de la varianza S^2 de

la muestra. Y, cuando se trata de la distribución **F**, parecida en su curva de probabilidad a la χ^2 , los conceptos de intervalos de confianza y error pueden aplicarse a la estimación del cociente de las varianzas procedentes de dos poblaciones: σ_1^2 y σ_2^2 , a partir de los estimadores puntuales S_1^2 y S_2^2 .

El principio de los intervalos de confianza y del grado de incertidumbre en la estimación de parámetros tiene bastantes aplicaciones en temas prácticos. En el ANEXO 13 se puede ver un resumen de esos casos de aplicación, y las fórmulas usadas para establecer los límites inferior y superior de cada tipo de intervalo de confianza. También es posible calcular intervalos de confianza para la media muestral \bar{X} cuando se conoce la media poblacional μ y la desviación estándar poblacional σ .

Por otro lado, usando el concepto de intervalo de confianza, se han desarrollado pruebas específicas para las distribuciones χ^2 , **t** de Student y **F** de Snedecor, las mismas que pueden usarse en una población sólo si los estadísticos usados para tales pruebas siguen las respectivas distribuciones **cuando la Hipótesis Nula es cierta**. Estas pruebas son la Prueba χ^2 , la Prueba **t** y la Prueba **F**, de amplia aplicación en las Pruebas de Hipótesis.

3.2.2. CARACTERÍSTICAS Y USO EN SEIS SIGMA DE LAS DISTRIBUCIONES NORMAL, χ^2 , **t y **F****

3.2.2.1. Características y uso de la Distribución Normal – Error Muestral

La distribución de Probabilidad Normal es con mucho la más importante de las distribuciones de probabilidad definidas en la Estadística. La Distribución Normal sustenta una buena parte de la teoría desarrollada por esta ciencia, y es clave en el estudio de la metodología Seis Sigma.

Cuando nos referimos al estudio de procesos, los datos de salida de los mismos, independientemente de su naturaleza, deben presentar una distribución de frecuencia en forma de campana, que tiene las características de una distribución normal. Si la distribución de frecuencias de ocurrencia de datos se aleja de la forma de campana, inmediatamente deberemos sospechar acerca de que algo significativo está incidiendo en el proceso y que esa anomalía va a afectar en forma negativa a la calidad del producto que sale del proceso.

En la Figura 40 se puede ver que los cuatro primeros histogramas presentan formas de campana, aunque ellas puedan estar descentradas o sufrir de una variabilidad excesiva que pone en duda la calidad resultante del proceso en cuestión. Esa debería ser la forma natural de la distribución de frecuencias de los datos de salida de un proceso que da como resultado un producto (bien o servicio).

Pero en la misma Figura 40 están las Figuras (e), (f), (g) y (h) que definitivamente no presentan una forma de campana y que por lo mismo están indicando que los procesos de los cuales proceden los datos están distorsionados por influencias externas que afectan negativamente la calidad. Entonces, si es que no se trata de datos mal tomados, será importante trabajar en esos cuatro procesos hasta que los resultados de salida tomen la forma de una campana normal.

Una característica importante que debe tenerse presente respecto de la Distribución Normal es que se trata de una **distribución continua**, es decir que trata con variables que pueden tomar valores a partir de un intervalo finito o infinito de números reales. Los números reales pueden ser positivos, negativos y fraccionarios. Las variables continuas se miden: voltaje, peso, volumen, longitud, espesor, velocidad, ángulo, resistencia, etc. Evidentemente, algunas variables, como el espesor, no pueden tomar valores negativos, pero sí otras variables como el voltaje o la temperatura.

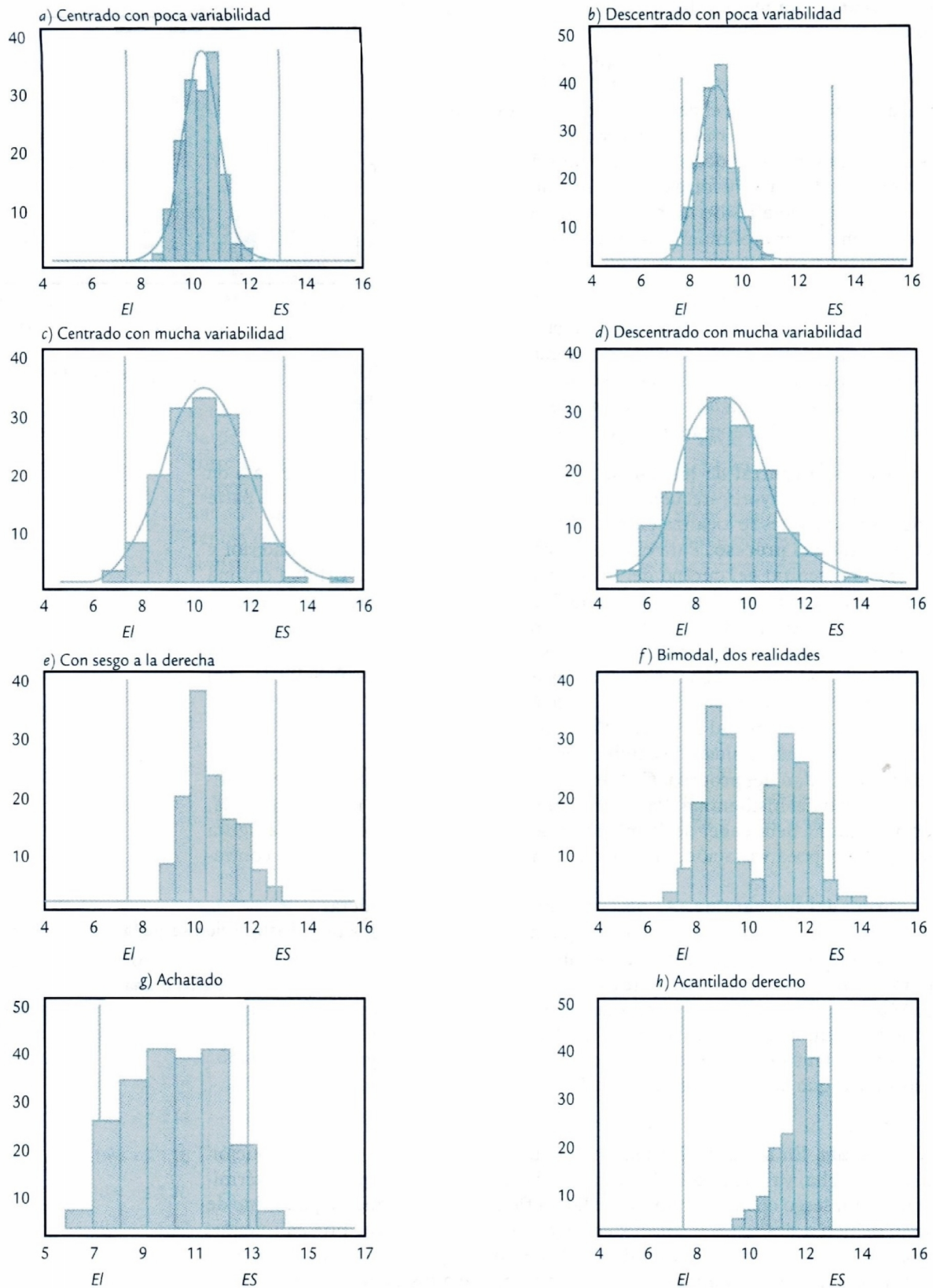


Figura 40: Casos de hitogramas de datos de procesos

FUENTE: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill

La Distribución Normal está presente en prácticamente todas las fases del Ciclo DMAIC, desde la métrica requerida para definir la línea de base, hasta la principal herramienta de Seis Sigma que es el DDE. De hecho, varias de las herramientas que utiliza la metodología se fundamentan en las propiedades de la campana de Gauss.

Sigma mide la dispersión alrededor de la media, y sólo tiene un sentido preciso en el ámbito de una distribución normal de probabilidades, o de aquellas otras distribuciones que tienen relación con la Normal. Si una distribución no es normal ni se relaciona con la distribución Normal, se deberán utilizar otras medidas de tendencia central como la mediana y la moda, y medidores de dispersión como los cuartiles, pero no varianzas o las desviaciones estándar.

Si se tienen datos obtenidos por muestreo, es decir sin considerar la población completa, se puede calcular el estimador llamado promedio muestral (\bar{S}) que permite ubicar de manera aproximada a la media poblacional (μ).

Para mostrarlo con un ejemplo, consideremos que se va a estudiar un proceso productivo que entrega lámparas led de diseño especial, entre 1.100 y 1.200 terminadas por día. Quien va a realizar el estudio, referido a la duración en horas de las mencionadas lámparas, no cuenta con ningún parámetro poblacional, y debe empezar calculando la media y la desviación estándar muestrales. Como se trata de un proceso, no se deben utilizar las fórmulas que tratan con poblaciones estáticas finitas o infinitas, y se recurre al cuadro de la Figura 36, hallándose que se debe trabajar con una muestra de mínimo 37 lámparas. Al tratarse de lámparas caras, el gerente encargado de la producción no va a permitir que se vaya más allá de ese número de artículos, por lo que ese será el tamaño muestral definitivo.

No importa si las vidas útiles de las lámparas led del problema siguen o no una distribución normal, pues se está trabajando con $n \geq 30$, razón por la cual se puede usar los estadísticos de este tipo de distribución. Entonces se encuentra que en la cámara de

envejecimiento las lámparas de la muestra tienen una duración promedio muestral \bar{X} de 4.679,43 horas, con una desviación muestral de S 29,60 horas. Sin embargo, no se puede saber con qué grado de precisión el valor \bar{X} está representando al parámetro poblacional μ (que, para fines de comparación, sabemos que en este ejemplo es de 4.674,75 horas). Esta incertidumbre dio origen al concepto de Intervalos de Confianza.

Aunque se conozcan los parámetros μ y σ (4.674,75 y 28,93 horas) calculados con toda la población, debe considerarse un aspecto aplicable a toda distribución continua: la probabilidad de que ocurra un valor particular X_i tiende a cero. Esto se explica porque en un intervalo $X_1 - X_2$, entre esos dos valores, existe una cantidad infinita de números reales, posibles de asumir por parte de X_i . La única manera de que la suma de probabilidades de tantos valores sea igual a 1 es que cada uno de esos posibles X_i tenga una probabilidad individual de ocurrencia que tienda a cero (o sea, puede ocurrir, pero es muy improbable que ocurra). La integración de la función de la Campana de Gauss (Figura 21) reúne todos los infinitesimales valores y obtiene el 100% de probabilidad acumulada. No se le puede preguntar a la distribución normal ¿cuál es la probabilidad de que una lámpara led tomada al azar dure exactamente 4.000 horas? La respuesta es: tiende a cero. Pero sí se le puede preguntar ¿cuál es la probabilidad de que la vida útil de una lámpara seleccionada al azar esté entre 4.651 y 4.720 horas?

Lo expuesto significa que las probabilidades calculadas para la la campana de Gauss sólo pueden interpretarse si se ven como áreas bajo la curva, de manera que la probabilidad de que un X_i seleccionado al azar tenga un valor que esté comprendido en el intervalo $X_1 - X_2$ es igual al área bajo la curva comprendida entre X_1 y X_2 (Ver Figura 41). En otras palabras, la curva de la distribución Normal puede ser utilizada para calcular áreas de probabilidad respecto de eventos relacionados con la variable de entrada X_i .

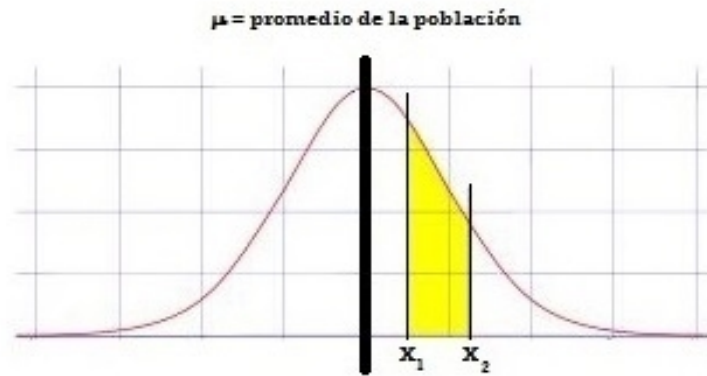


Figura 41: Área bajo la curva = probabilidad
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El asunto ahora es cómo calcular el área bajo la curva. Para evitar los cálculos de integración que son muy complejos, la Estadística primero transforma la curva normal con la variable X_i en el eje de las abscisas en la llamada Distribución Normal Estándar, que reemplaza las X_i por un factor denominado Z , que se calcula con la Fórmula 4. Y después proporciona tablas donde consultar áreas ya integradas para determinados rangos entre los extremos, o la mitad de la curva, y los valores particulares de Z que se calculan en los problemas.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

No importan los valores X_i de la serie particular de datos que siguen una distribución normal, la forma general de la curva puede cambiar, pero las áreas entre iguales valores de Z son siempre las mismas. La Distribución Normal Estándar, traduciendo Z a número de desviaciones estándar σ , puede verse dibujada en la Figura 42.

Otros datos de utilidad consisten en que la superficie comprendida entre 1σ a la izquierda y 1σ a la derecha de la media es siempre el 68,26% del área total, para el rango equivalente de 2σ el área es del 95,46% y para el rango de 3σ a la izquierda y 3σ a la derecha el área de probabilidad es del 99,73%. También es interesante notar que para toda curva normal, estándar

o no, el máximo valor alcanzado por la función es de $0,3989/\sigma$. El cambio de curvatura de cóncavo a convexo ocurre siempre a 1σ de distancia de la media.

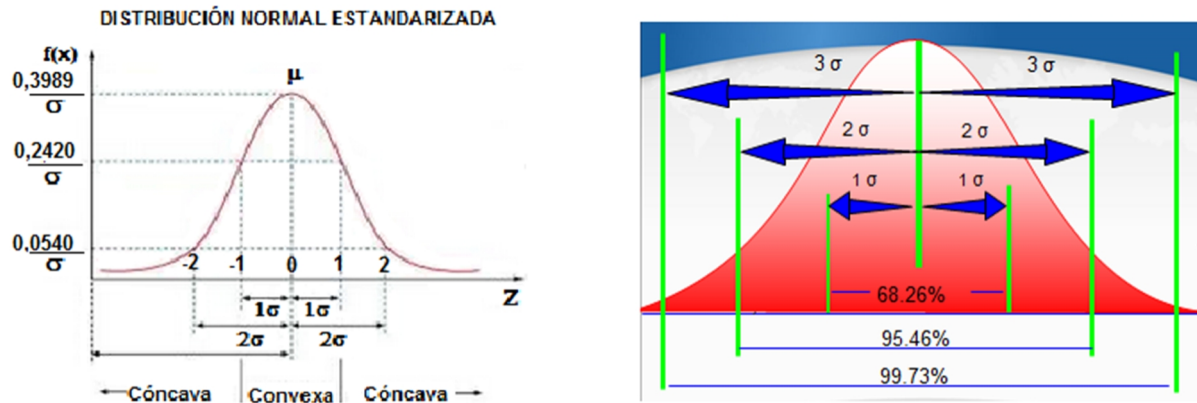


Figura 42: Distribución Normal Estandarizada

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Continuando con el ejemplo, para poder estimar la probabilidad de que una lámpara elegida aleatoriamente de la producción diaria tenga una vida útil comprendida entre 4.651 y 4.720 horas, se deben primero calcular los valores de Z correspondientes a esas horas de vida, que están a la izquierda y a la derecha de la media muestral $\bar{X}=4.679,43$ horas, y después ver en la tabla de áreas los valores porcentuales a sumar:

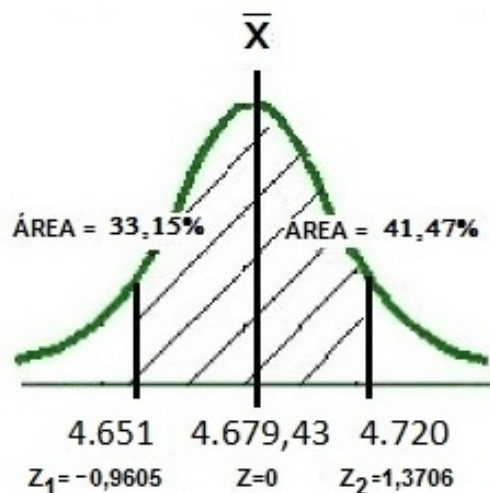


Figura 43: Ejemplo de cálculo de probabilidad

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

La probabilidad total es la sumatoria de las dos semiáreas, dando una probabilidad total del 74,62%. Cuando se aplica la Estadística, casi nunca se conocen los parámetros poblacionales μ y σ , por lo que se debe trabajar con lo que es accesible: los estimadores muestrales \bar{X} y S . Pero con fines de ilustración en este ejemplo, se va a calcular el área de probabilidad para los límites de vida especificados, a partir de los parámetros poblacionales.

Con $\mu = 4.674,75$ y $\sigma = 28,93$ se obtiene $Z_1 = -0,8209$ y $Z_2 = 1,5641$. Los valores de área son 29,39 % y 44,12 %, respectivamente. El área total significa un 73,51% de probabilidad de que una lámpara seleccionada aleatoriamente dure entre 4.651 y 4.720 horas. Con los estimadores muestrales se calculó un 74,62% de probabilidad. Esa diferencia significa un error de como el 1,5% en la estimación. Es por este tipo de error que Seis Sigma ha establecido un factor de seguridad de $1,5\sigma$ en el cálculo del nivel de desempeño de los procesos.

El error que aparece al usar los estimadores muestrales en vez de los parámetros poblacionales debe tenerse presente en varios temas importantes. Al error implícito al muestreo se le llama **error muestral**, **error estándar** o **desviación estándar de la distribución muestral**. Este concepto se desprende del enunciado del Teorema del Límite Central: las medias de las muestras de un mismo tamaño extraídas de una población siguen una distribución normal, independientemente de la distribución que siga esa población. El error muestral es la desviación estándar de las medias muestrales respecto de la media de las medias $\bar{\bar{X}}$ (que resulta ser idéntica a μ), se simboliza $\sigma_{\bar{x}}$ y su valor se calcula con la Fórmula 15.

Fórmula 15

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Es una fórmula válida si se dispone de la desviación estándar poblacional σ , si la población es infinita ($N > 50.000$) o es finita con reposición, y adicionalmente:

- Si $n \geq 30$ no es condición que los datos sigan una distribución normal.
- Si $n < 30$, los datos deben seguir una distribución normal.

Se usa también cuando la población es finita y si $n < 0,05 N$.

Cuando la población es finita, pero $n \geq 0,05N$, entonces debe realizarse un ajuste que da la Fórmula 16:

Fórmula 16

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

Como normalmente no se conoce la desviación estándar poblacional, se puede reemplazar en las fórmulas 15 y 16 $\sigma_{\bar{x}}$ por $S_{\bar{x}}$ quedando las fórmulas definitivamente como:

Fórmula 17

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Fórmula 18

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

Estas fórmulas utilizan la desviación estándar muestral, que es lo que usualmente se puede llegar a conocer, y siguen las mismas reglas de aplicación que las consideradas para las fórmulas 15 y 16, con la única diferencia de que si $n < 30$ (pero se tiene certeza de la normalidad de los datos) se debe utilizar definitivamente la Distribución t de Student para hallar los intervalos de confianza. Si los datos son menores a 30, no se conoce σ y se sabe que ellos no exhiben normalidad, o no se tiene certeza de la misma, entonces este tipo de análisis no es aplicable.

El error estándar es la medida del alejamiento del estimador respecto del parámetro, o sea $\mu = \bar{X} \pm e$ (en datos continuos) y $\pi = p \pm e$ (en proporciones). Es el concepto de error muestral el que permite desarrollar fórmulas de tamaño de muestras y también sirve de base para el estudio de los Intervalos de Confianza, como se ve en los siguientes casos:

- Si se conocen μ y σ de una población, ¿cuál es la probabilidad de que la media de una muestra aleatoria de encuentre dentro de un intervalo dado? (Ver Figura 44).

Donde **Z** se calcula con la Fórmula 19.

Fórmula 19

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

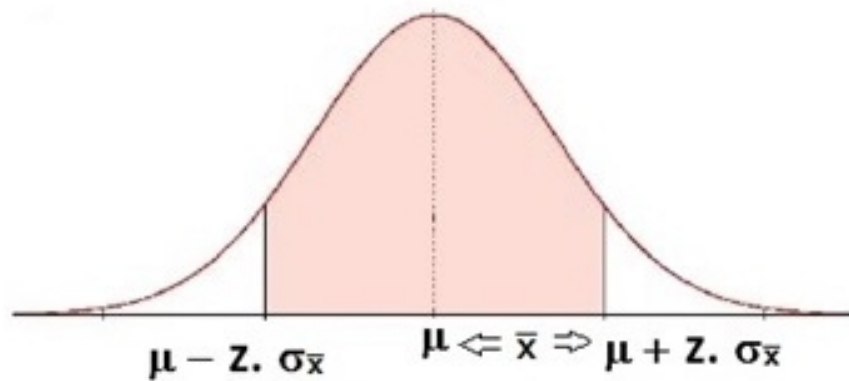
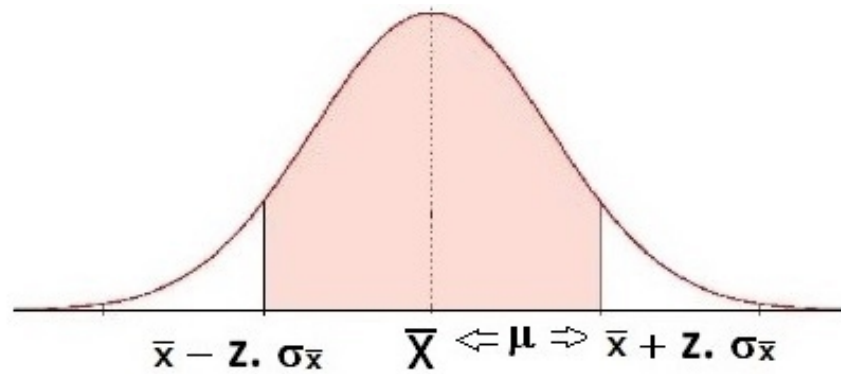


Figura 44: Intervalo de la media muestral alrededor de μ

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

- Si se conoce \bar{X} de una muestra y σ de la población de la cual procede esa muestra, ¿cuál es la probabilidad de que la media de la población se encuentre dentro de un intervalo dado? (Ver Figura 45). Donde **Z** se calcula con la Fórmula 19.



**Figura 45: Intervalo de la media poblacional
alrededor de \bar{X}**

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

- Se pueden desarrollar otros tipos de Intervalos de Confianza para la inferencia de varios parámetros poblacionales y combinaciones de parámetros poblacionales (Ver ANEXO 13).

Quando se trabaja con proporciones y su parámetro π , se está tratando en realidad con la distribución Binomial aproximada a la Normal en un caso especial. Las condiciones específicas para poder hacerlo son dos: si $np \geq 5$ y $nq \geq 5$. Si se cumplen las dos condiciones, entonces esta aproximación tiene una media igual a p , y una varianza muestral igual a pq/n . Nótese que estos estadísticos son diferentes a los definidos en el ANEXO 11, lo cual ocurre porque las fórmulas de los límites de los intervalos de confianza que se ven en el ANEXO 13 sirven para muestras grandes o pequeñas, y no sólo para muestras grandes. Por esa misma razón, no hay que hacer ajustes del tipo que se ve en la Fórmula 16. $S^2_p = pq/n$ es la varianza de la distribución de las proporciones, que se disponen simétricamente alrededor de la media p , en forma de campana.

NOTA: EN TODAS LAS APLICACIONES DE LA DISTRIBUCIÓN NORMAL A CÁLCULOS DE PROBABILIDAD POR ÁREAS Y A LA CONSTRUCCIÓN DE INTERVALOS DE CONFIANZA, DEBE TOMARSE EN CUENTA QUE NO IMPORTA SI $n < 30$, SIEMPRE Y

CUANDO SE TENGA LA CERTEZA DE QUE LA POBLACIÓN SIGUE ESTA DISTRIBUCIÓN, Y DE ALGUNA FORMA SE PUEDE CONOCER LA VARIANZA POBLACIONAL σ . CUANDO $n \geq 30$, NO IMPORTA SI LA POBLACIÓN SIGUE O NO LA DISTRIBUCIÓN NORMAL, NI IMPORTA DESCONOCER σ . BASTA TRABAJAR CON S .

- El error muestral sirve también para calcular los límites superior e inferior de las Cartas de Control que usan las medias de subgrupos racionales. Como se verá más adelante, se ha establecido que los límites de control de los diferentes tipos de cartas o gráficos desarrollados para evaluar el comportamiento de los procesos deben ser capaces de abarcar el 99,73% de los valores posibles de la variable que se controla. En el caso de las Cartas de Control de las Medias, los límites son:

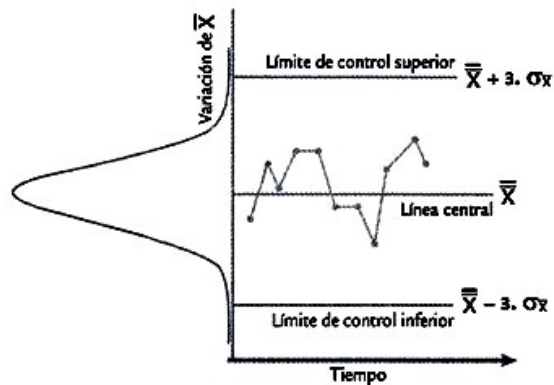


Figura 46: Gráfico de Control de Medias

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNIDOR

- El error muestral calculado a partir de la distribución normal se usa a determinar los tamaños n de muestras procedentes de poblaciones estáticas finitas e infinitas. Por otro lado, se debe notar que el numerador de la Fórmula 19 es en realidad el error que ocurre entre la predicción del estimador muestral y el real valor de la media de la población, o sea $E = \bar{X} - \mu$. Esto se expresa también como $\mu = \bar{X} \pm E$. Si es que la primera expresión del error E se reemplazan en la Fórmula 19 y se despeja, se obtiene la Fórmula 11, vista en el apartado correspondiente a muestreo.

Fórmula 11

$$n = \frac{Z^2 \sigma^2}{E^2}$$

Esto, para poblaciones infinitas, para poblaciones finitas con reposición y para poblaciones finitas, con $n < 0,05N$.

Para poblaciones finitas, con $n \geq 0,05 N$ se debe utilizar la corrección

Fórmula 16

$$\sigma_z = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

Simplificando, se tiene la Fórmula 7 ya vista:

Fórmula 7

$$n = \frac{N}{1 + \frac{E^2 * (N-1)}{Z^2 * \sigma^2}}$$

Igualmente, si no se conoce, σ se puede reemplazar por S , y se siguen las mismas reglas enunciadas.

3.2.2.2. Características y uso de la Distribución Chi Cuadrado

Algunas de las pruebas que usan esta distribución son posibles si es que los estadísticos analizados siguen la distribución Chi Cuadrado cuando la Hipótesis Nula es cierta. Estas pruebas son útiles para Seis Sigma porque tienen aplicación en la resolución de problemas con variables categóricas usando **Pruebas de Hipótesis**: puede trabajar con variables procedentes de una población (Pruebas de Bondad de Ajuste) o con variables procedentes de 2 poblaciones diferentes (Pruebas de Independencia y Pruebas de Homogeneidad).

Las Pruebas de Bondad de Ajuste básicamente sirven para determinar si una población tiene un comportamiento normal, exponencial, binomial, etc. Se obtienen datos cuantitativos de la población en cuestión y para un nivel de confianza especificado se puede determinar si la variable se ajusta o no a la distribución que se supone describe bien la frecuencia de ocurrencia de los datos provenientes del experimento o de la observación. En el caso de prueba de datos que se ajusten a una distribución normal, se trata en realidad de otro tipo de **prueba de normalidad**.

Las Pruebas de Independencia analizan la frecuencia de k variables cualitativas con categorías múltiples, procedentes de muestras de 2 poblaciones, para determinar si las frecuencias de ocurrencia de las k variables están relacionadas con las 2 poblaciones de las que proceden o no. Por ejemplo: ¿está relacionado el desempeño académico con el estado nutricional? ¿Es dependiente el tamaño de una familia del nivel de educación de los padres? ¿Está relacionado el desempleo con el incremento de la criminalidad? ¿Tiene que ver la calidad de un producto con su precio? ¿Existe relación entre el consumo de tres marcas de cereal presentes en el mercado y la residencia de los consumidores en Quito o Guayaquil?

Las Pruebas de Homogeneidad evidencian si k muestras independientes procedentes de 2 poblaciones son homogéneas respecto de algún criterio de clasificación, expresado como proporción. Por ejemplo, Si se vacuna a un grupo de personas y otro grupo no, y se analiza después las proporciones de personas de los dos grupos que contrajeron la enfermedad, la Prueba Chi Cuadrado puede determinar si las proporciones en las dos poblaciones son los suficientemente diferentes como para inferir que la vacuna fue efectiva.

Debe notarse que en ninguno de los tres casos descritos se cuenta con medias o desviaciones estándar. Por eso se les llama Pruebas no Paramétricas. En los textos o en Internet se pueden hallar los procedimientos de resolución para ese tipo de problemas, basados en las llamadas Tablas de Contingencia. Se los puede resolver también por medio de software

disponible. En todo caso, siempre están implicados la Hipótesis Nula, la Hipótesis Alternativa y α , el nivel de significancia.

Como no se puede tener valores $f(X_i) = \chi^2_{(X_i)}$ negativos, la curva de densidad de probabilidad de Chi Cuadrado (Ver Figura 39) está sesgada hacia la derecha, presentando una cola hacia ese lado.

Debe señalarse que los matemáticos aún no han podido encontrar la manera de integrar la función de densidad de probabilidad de la Distribución Chi Cuadrado, lo cual impide el cálculo exacto de áreas bajo la curva. Lo que se tiene son procedimientos de cálculo aproximativo y algoritmos para uso en computador. La Estadística provee a quienes usan esta y otras distribuciones de tablas con las cuales se pueden calcular las áreas bajo la curva.

La distribución Chi Cuadrado es una familia de infinitas curvas cuya forma depende del de los grados de libertad, $gl=gdl=df=m=\gamma=k=(n-1)$, dependientes del tamaño n de la muestra. En la Figura 47 puede verse que para tamaños de aproximadamente 30 elementos la distribución Chi Cuadrado se aproxima a una distribución normal, con la media ubicada en $\chi^2=n$.

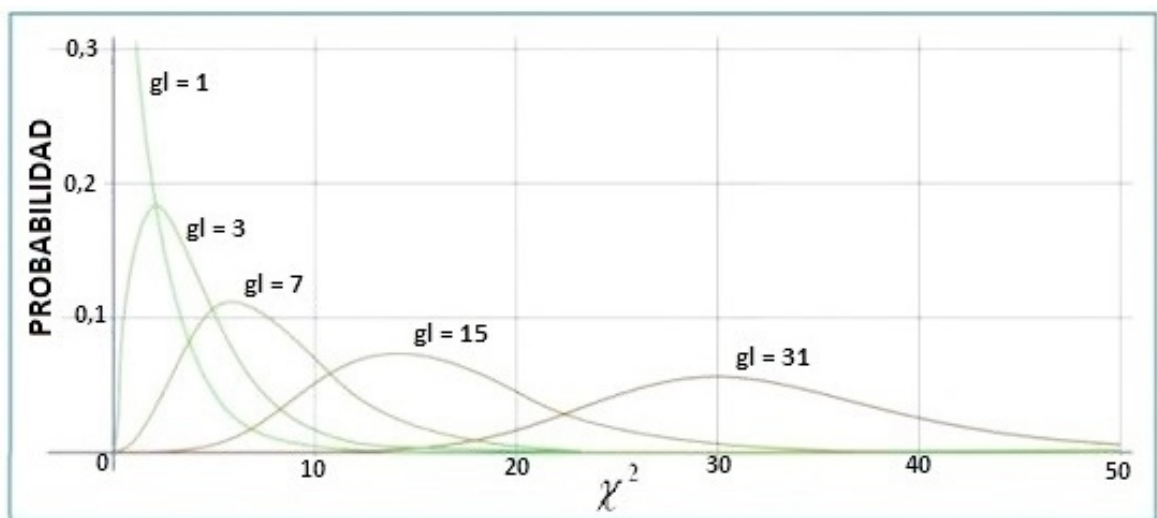


Figura 47: Familia de curvas Chi Cuadrado χ^2

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En la Figura 47 el eje de las abscisas está representado por χ^2 , no por X_i . Por lo tanto, se trata de una forma de curva estándar, similar a la Curva Normal Tipificada o Estándar

Otra importante aplicación de esta distribución se basa en que las varianzas S^2 de muestras extraídas de una población que tiene una distribución normal siguen una distribución Chi Cuadrado. Por ello, se pueden usar áreas bajo la curva para calcular probabilidades de ocurrencia de eventos de la varianza S^2 , y se pueden construir intervalos de confianza para dicha varianza muestral, siempre y cuando se disponga de la varianza poblacional σ^2 . A la inversa, se sabe que si se cuenta con S^2 de una muestra extraída de una población con distribución normal, de la cual no se conoce σ^2 , los posibles valores de esta varianza poblacional siguen también una distribución Chi Cuadrado. Por esta razón, otra vez es posible calcular un intervalo de confianza, esta vez para los posibles valores de la varianza poblacional σ^2 .

El estadístico Chi Cuadrado se calcula con la Fórmula 20, en la cual o se conoce σ^2 o se conoce S^2 , pero se cuenta siempre con χ^2 que sale de las tablas, dependiendo del nivel de confianza que se quiera en la resolución del problema en cuestión.

Fórmula 20

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2}$$

Debe notarse que las tablas disponibles para las proporciones de área de la distribución Chi Cuadrado normalmente dan las áreas hacia la derecha del valor de χ^2 especificado.

Ejemplos de aplicación:

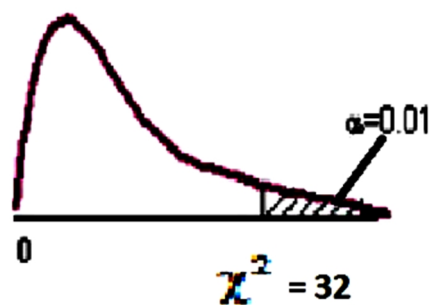
1.- Los tiempos requeridos para terminar un proceso siguen una distribución normal con una desviación estándar $\sigma = 1$ minuto. Si se elige al azar una muestra de 17 procesos, ¿cuál es la probabilidad de que la varianza muestral sea mayor que 2 minutos?

Solución:

En este caso, no se requiere trabajar con un intervalo de confianza, si no que se debe ubicar el área bajo la curva Chi Cuadrado que se encuentra más allá del estadístico χ^2 correspondiente a la varianza muestral $S^2 = 2$ minutos.

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} = \frac{(17-1)(2)}{(1)^2} = 32$$

El valor de Chi Cuadrado en el eje de las abscisas de la curva es 32, según la Fórmula 20, y con ese dato, se halla en el ANEXO 14 que para $\chi^2 = 32$ y 16 grados de libertad, el nivel de significancia de cola derecha es 0,01:



Lo que significa que la probabilidad de que la varianza de la muestra sea mayor a dos minutos es del 1%.

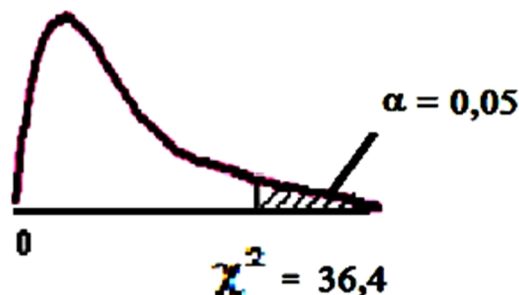
2.- Hallar la probabilidad de que una muestra aleatoria de 25 datos que siguen una distribución normal con $\sigma^2 = 6$ tenga una varianza muestral (a) mayor que 9,1 (b) entre 3,462 y 10,745.

Solución:

(a) Nuevamente, se trata de un problema de áreas bajo la curva. Para un $S^2 > 9,1$, se debe ver el área que va más allá, a la derecha, del χ^2 correspondiente a $S^2 = 9,1$ y $\sigma^2 = 6$

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} = \frac{(25-1)(9,1)}{6} = 36,4$$

En el ANEXO 23 se encuentra que para $\chi^2 = 36,4$ y $gl=24$ el área de la cola derecha es 0,05:



La probabilidad de que la varianza muestral sea mayor que 9,1 es del 5%.

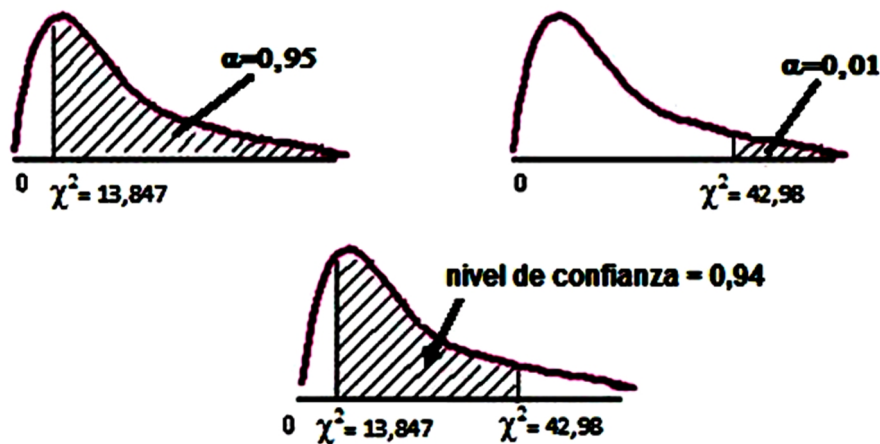
(b) $3,462 < S^2 < 10,745$

Se tienen 2 valores de χ^2 entre los cuales se ubica el área buscada:

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} = \frac{(25-1)(3,462)}{6} = 13,847$$

$$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2} = \frac{(25-1)(10,745)}{6} = 42,98$$

En el ANEXO 23 se encuentra que para $\chi^2 = 13,847$ y $gl=24$ el área de cola derecha es 0,95 y para $\chi^2 = 42,98$ y $gl=24$ el área de cola derecha es 0,01. Por ello, el nivel de confianza para el intervalo propuesto es del 94%.

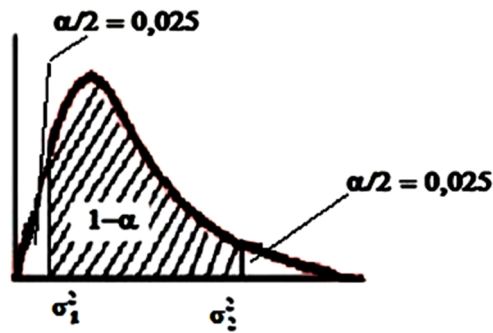


3.- Una empresa empaca cereal. Los pesos finales siguen una distribución normal. Se realizó un muestreo de 10 paquetes, encontrándose los siguientes pesos, en libras: 46,4 – 46,1 – 45,8 – 47,0 – 46,1 – 45,9 – 45,8 – 46,9 – 45,2 – 46. Encuentre los límites de la varianza poblacional σ^2 para un intervalo de confianza del 95%.

Solución: Este es un caso que involucra Intervalo de Confianza.

Se puede calcular la varianza muestral $S^2 = 0,2862$.

Para calcular los límites inferior y superior de la varianza poblacional se podría ubicar el intervalo de confianza del 95% en cualquier sitio debajo de la curva Chi Cuadrado, pero por convención (no porque la curva sea simétrica) se la ubica con el nivel de error dividido para dos en los dos extremos:



Con el nivel de error dividido simétricamente a los dos lados, los grados de libertad $gl=9$, y las fórmulas del ANEXO 13, se pueden hallar los límites superior e inferior del intervalo de confianza para la varianza poblacional. Los límites son σ_1^2 y σ_2^2 se calculan:

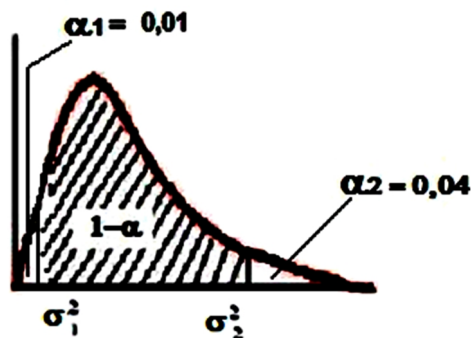
$$\sigma_1^2 = \frac{(n-1)S^2}{\chi_{\alpha/2, n-1}^2} \quad \sigma_2^2 = \frac{(n-1)S^2}{\chi_{1-\alpha/2, n-1}^2}$$

De donde se encuentra:

$$\sigma_1^2 = 0,1354 \quad \sigma_2^2 = 0,9540$$

De manera que, con el 95% de certeza, la varianza poblacional va a variar entre 0,135 y 0,953.

Si es que se hubiera decidido ubicar de otra manera el intervalo de confianza del 95%, es decir no centrado y dejando dos áreas de error iguales a izquierda y derecha (0.025 y 0.025) el resultado sería diferente. Por ejemplo, si se deja a izquierda un área de 0.01 y a la derecha una de 0.04:



Aplicando nuevamente las fórmulas del ANEXO 13, se obtienen los valores $\sigma^2_1 = 0,146$ y $\sigma^2_2 = 1,234$. De manera que en este caso, con el 95% de certeza, la varianza poblacional va a variar entre 0,146 y 1,234. Es un resultado completamente diferente, incluso por su rango de variación. Por eso es necesario respetar la convención de distribuir en partes iguales la significancia total.

Finalmente, puede afirmarse que Chi Cuadrado interviene en la Regresión por Mínimos Cuadrados, a través de su implicación con la distribución t; y en los cálculos de Anova por su relación con la distribución F.

3.2.2.3. Características y uso de la Distribución t de Student

Existen varias consideraciones respecto del uso de la distribución t de Student. En primer lugar, una prueba t de Student o t-Test es cualquier prueba en la que el estadístico que se utiliza presenta esta distribución cuando la Hipótesis Nula es cierta. Esto tiene importancia relevante en las Pruebas de Hipótesis.

Por otro lado, se debe mencionar que históricamente la distribución t de Student fue desarrollada por el químico William Gosset para resolver la dificultad que se tiene al estimar la media poblacional μ de una población normalmente distribuida, a partir de una muestra de tamaño pequeño ($n < 30$) y cuando, además, se desconoce la varianza poblacional. Los intervalos de confianza obtenidos al hacer la estimación con t son más grandes y menos precisos que los que se obtienen con la campana de Gauss, pero son suficientes para varias aplicaciones.

Por la procedencia de la distribución t, ésta puede tener datos X_i con cualquier valor en los números reales. Si una variable aleatoria X_i tiene una distribución normal, entonces para el estadístico t (Ver Fórmula 21) se puede definir la función de densidad de probabilidad que se ve

en ANEXO 12. Esa función corresponde a una familia de curvas estándar cuya forma depende de los grados de libertad de la muestra, $gl=gdl=df=m-\gamma=k=(n-1)$.

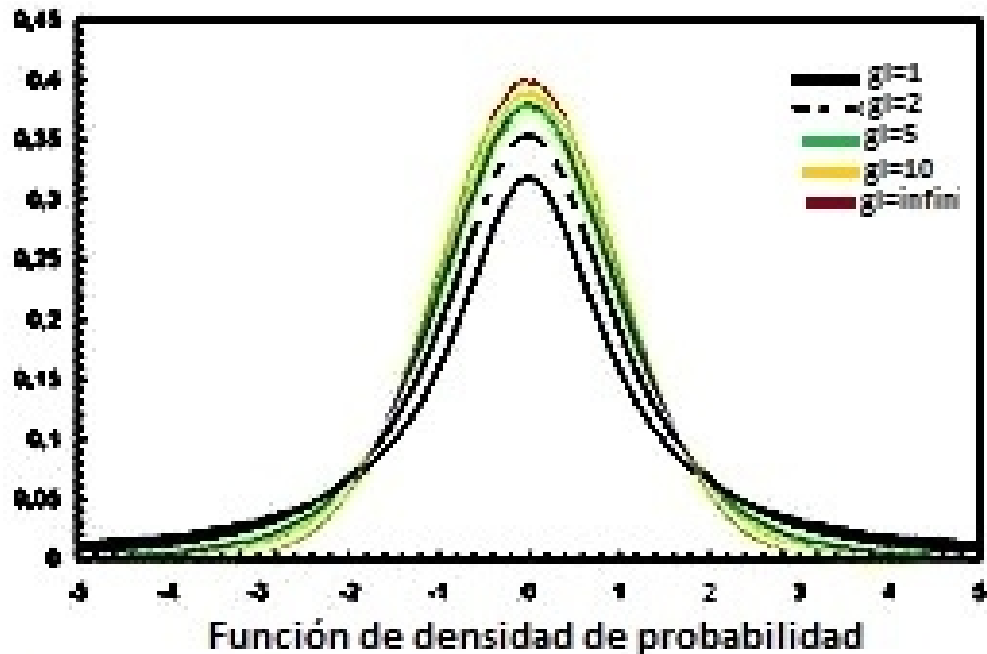


Figura 48: Familia de curvas t de Student

ELABORADO POR: BOLIVAR CÓNDORE

Fórmula 21

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S(x)/\sqrt{n}}$$

$$S^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

En apariencia, la distribución t estandarizada es similar a la distribución normal estandarizada, pero en realidad tiene más área en los extremos que en el centro. Cuando el tamaño de la muestra es igual a 120 ($k=119$), las distribuciones t y Normal son prácticamente idénticas. Los especialistas usan la distribución normal en lugar de la distribución t desde $n \geq 30$. Esto último gracias al Teorema del Límite Central, cuando se supone que cualquier tipo de distribución se normaliza con el uso de las fórmulas de distribución de probabilidad.

En el ejercicio del protocolo Seis Sigma, cuando se aplican las diferentes fórmulas estadísticas a datos que no siguen una distribución normal se está permitiendo que actúe el Teorema del Límite Central. Lo mismo ocurre cuando se les aplican las fórmulas propias de las distribuciones de probabilidad. Esto se debe a que en toda fórmula están implicadas, de una u otra manera, operaciones de suma o de cálculos de promedios. La única condición impuesta por este teorema es que los datos disponibles sean al menos 30. El Teorema del Límite Central ayuda en los cálculos estadísticos cuando $n > 30$ y no hay distribución normal. La distribución t ayuda cuando la muestra tiene menos de 30 elementos y, aunque no se conozca la varianza poblacional σ , se tiene alguna seguridad acerca de la distribución normal de la población. Si la muestra tiene menos de 30 elementos, la población no sigue una distribución normal y no se conoce σ , entonces no se puede aplicar la distribución t.

La distribución t puede usarse para estimar el intervalo de confianza de la media poblacional μ , en torno a la media muestral \bar{X} , cuando la población sigue una distribución normal, se conoce la varianza muestral S conocida y $n < 30$, (Ver ANEXO13):

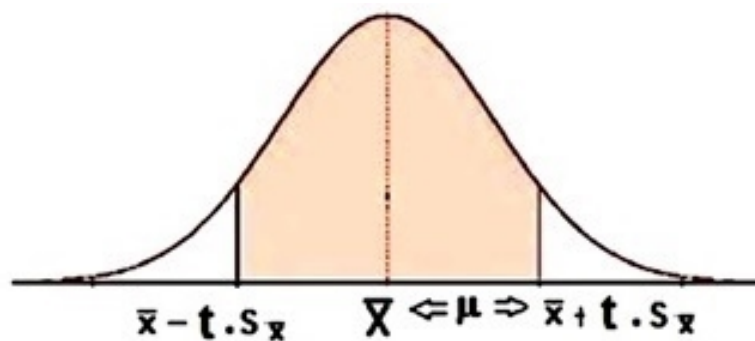


Figura 49: Intervalo de la media poblacional alrededor de \bar{X} Usando la distribución t de Student

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Otra aplicación en el ámbito de los intervalos de confianza se refiere a la estimación de la diferencia entre las medias procedentes de dos poblaciones que siguen distribuciones normales, cuando no se conoce las varianzas de esas poblaciones, pero se supone que son

aproximadamente iguales, y los tamaños de las dos muestras son menores a 30 (Ver ANEXO 13).

La distribución t se usa, además, en las Pruebas de Hipótesis, en la Regresión por Mínimos Cuadrados y en el Análisis de varianza (ANOVA – LSD).

Esta distribución se usa también para modelar productos cuya vida está dada por el componente que dura menos.

3.2.2.4. Características y uso de la Distribución F

Una Prueba F (de Snedecor o Fisher) es aquella en la que el estadístico utilizado sigue una Distribución F cuando la Hipótesis Nula es cierta. La distribución F comparte esta característica con las distribuciones Chi Cuadrado y t, por lo que junto con ellas y con la distribución Normal, es de las más utilizadas en la teoría de Intervalos de Confianza, en Pruebas de Hipótesis y en el Diseño de Experimentos.

Al igual que las otras distribuciones mencionadas, se trata de una distribución de probabilidad continua, y es ampliamente utilizada en la inferencia estadística, fundamentalmente en la contrastación de la igualdad de varianzas de dos poblaciones que siguen distribuciones normales. Pero sobre todo se la utiliza en el Análisis de Varianza.

Esta distribución se origina de la división de dos variables aleatorias e independientes (U y V) que siguen una distribución Chi Cuadrado cada una. La variable del numerador tiene m grados de libertad y la del denominador tiene n grados de libertad. Cuando cada variable se divide para su respectivo grado de libertad, la variable resultante sigue una distribución F:

$$U \rightarrow \chi_m^2 \text{ y } V \rightarrow \chi_n^2 \qquad X = \frac{U/m}{V/n}$$

La función de densidad de probabilidad que se puede deducir para la distribución F puede verse en el ANEXO 12. Como tanto el numerador como el denominador no pueden ser menores que cero, la distribución F sólo puede tomar valores positivos (Ver Figura 50)

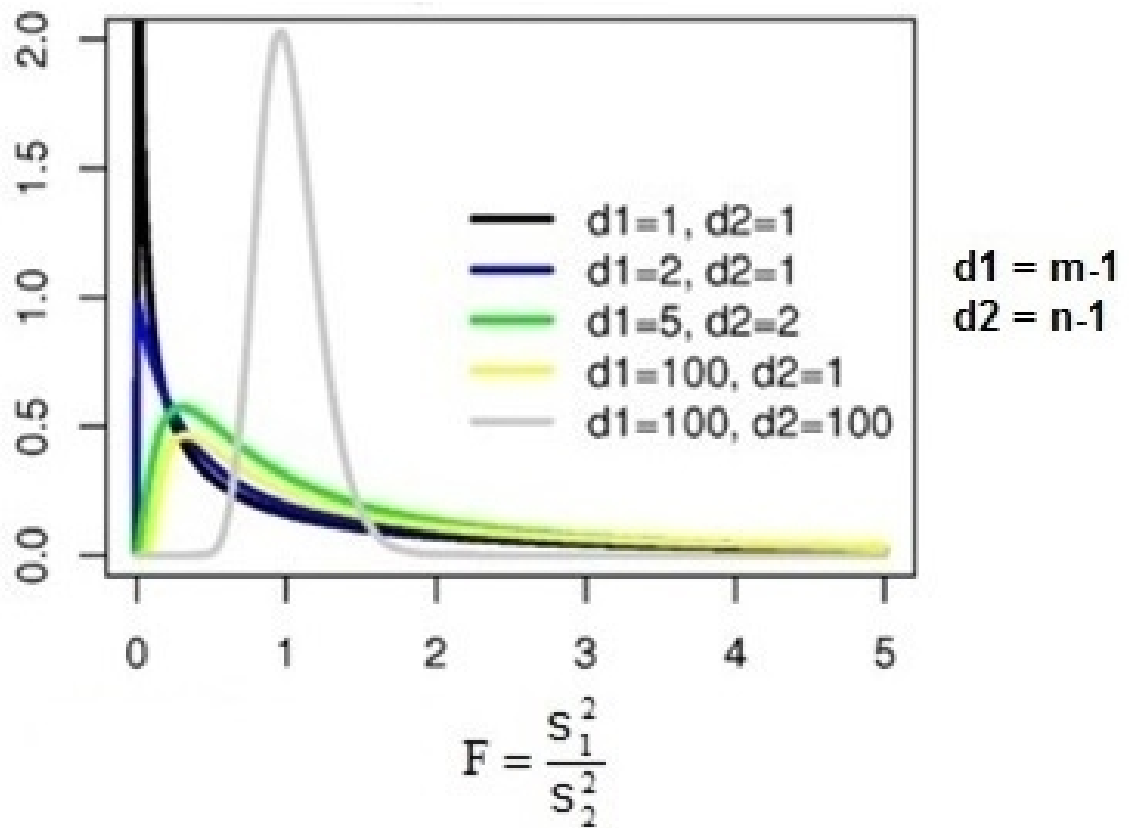


Figura 50: Familia de curvas F

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Para valores elevados de grados de libertad de U y V la distribución F se aproxima a la distribución Normal. El área bajo la curva es igual a 1.

En las pruebas de contrastación de varianzas, el estadístico utilizado es:

Fórmula 22

$$F_o = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad F_o = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad F_o = \frac{\frac{S_1^2}{\sigma_1^2}}{\frac{S_2^2}{\sigma_2^2}}$$

Los valores de F_0 se pueden ver en las tablas del ANEXO 16. Como las tablas son bidimensionales, y el valor de F_0 depende de dos grados de libertad (del numerador y del denominador), habrá una tabla para cada nivel de significancia. Para la industria se consideran importantes las significancias de 1%, 5% y 10%. Estas pueden estar distribuidas en una o dos colas.

La distribución F puede utilizarse para realizar cálculos de áreas de probabilidad bajo la curva y para Intervalos de Confianza, pero donde halla su máxima utilización es en las Pruebas de Hipótesis y en el Diseño de Experimentos. En realidad, F es la distribución más importante en la ejecución de experimentos, pues permite realizar cálculos sobre varianzas diseminadas, determinando si las diferencias mostradas entre ellas son significativas y por lo tanto atribuibles a cambios importantes en el comportamiento de las poblaciones en estudio.

Ejemplo de uso en áreas de probabilidad bajo la curva: Se analiza el desempeño de dos máquinas de la misma marca, pero de diferentes años de fabricación. Se toma una muestra de cada máquina, las dos de 16 elementos. (a) Encontrar la probabilidad de que la razón de varianzas F_0 sea mayor a 1,97. (b) Encontrar qué valor de F_0 da una probabilidad a la derecha de 0,15.

- (a) Conocemos el valor de F_0 , y los grados de libertad en el numerador y en el denominador, los dos iguales a 15. Como se tiene una tabla de valores F para cada área de probabilidad de cola derecha (1%, 2,5%, 5%, 10%, etc.) habría que revisar todas las tablas posibles, hasta encontrar en cuál de ellas se tiene el cruce de $gl\text{-numerador}=gl\text{-denominador}=15$ conteniendo exactamente un valor de $F_0 = 1,97$. Tal combinación se halla sólo en la tabla de F para un área de probabilidad derecha del 10%. Y ésta es la respuesta. Pero si no se tiene la tabla precisa, no se puede resolver el problema, por lo que es mejor recurrir a programas informáticos que dan las

áreas para cualquier combinación de datos, pues realizan la integración de la función de densidad de probabilidad.

Se puede usar, por ejemplo, el Excel con la ruta de comandos FÓRMULAS>> MÁS FUNCIONES>>ESTADÍSTICAS>>DISTRIB.F.CD e introduciendo los datos del problema.

- (b) En la segunda pregunta, se tiene la probabilidad de cola derecha = 15%. Se tienen también los grados de libertad. Si se dispusiera de la tabla correspondiente a la significancia=0.15 sería posible ver el valor del estadístico F_0 . No siempre se tienen todas las tablas necesarias, por lo que ahora se puede recurrir a la informática, en este caso al Excel y usar la ruta de comandos FÓRMULAS>> MÁS FUNCIONES>>ESTADÍSTICAS>>DISTRIB.F.INV (o INV.F). Ingresando los datos del problema, se encuentra un valor de F_0 igual a 1,73, correspondiente al cociente de las varianzas de las dos muestras.

Pero la aplicación más importante de la distribución F aparece en las Pruebas de Hipótesis.

3.2.3. PRUEBAS DE HIPÓTESIS

Llamadas también Pruebas de Contraste o Test de Hipótesis, constituyen un modelo de decisión sobre la aceptación o rechazo de alguna afirmación realizada por el investigador respecto de la población que él estudia. En el proceso de decisión por Prueba de Hipótesis se debe conocer o la varianza de la población o la varianza de la muestra.

La afirmación respecto de lo que se quiere demostrar lo enuncia la Hipótesis Alternativa H_A . Usualmente el investigador propone H_A en base a lo que a él le parece que debería ser, basado en las observaciones que ha realizado, en las predicciones que arrojan modelos preexistentes o en un proceso de razonamiento inductivo. Por eso es necesario que la hipótesis alternativa sea realista y comprobable. La Hipótesis Nula H_0 se opone a la afirmación realizada

por la Hipótesis Alternativa. Se suele decir que la Hipótesis Nula defiende el statu quo, lo actual, aquello con lo que ha venido trabajando, frente a la posición normal de un investigador de proponer situaciones nuevas a partir de sus observaciones. La Hipótesis Nula H_0 se opone a lo nuevo, y niega a H_A . Debe hacerlo planteando una igualdad. Por ejemplo, el investigador puede afirmar respecto de la población:

H_A .- La media del proceso A no cumple con la especificación B

H_A .- El tiempo promedio de ejecución del servicio A es $< 1,5$ horas, en promedio

H_A .- La vida media del artículo A es mayor que 5 años

Y las respectivas hipótesis alternativas serían:

H_0 .- Media del proceso A = especificación B

H_0 .- Tiempo promedio de ejecución del servicio A $\geq 1,5$ horas

H_0 .- Vida media del artículo A ≤ 5 años.

En el ámbito del Diseño de Experimentos, la Hipótesis Nula niega la significación del factor que se prueba.

Las distribuciones usadas preferentemente en las Pruebas de Hipótesis son la Normal, Chi Cuadrado, t y F. El esquema de prueba “Hipótesis Nula – Hipótesis Alternativa” se basa en el hecho de que se han desarrollado estadísticos de prueba (Z_0 , χ_0^2 , t_0 y F_0) que siguen, respectivamente, la distribución Normal, la distribución Chi Cuadrado, la distribución t o la distribución F **sólo cuando la Hipótesis Nula implicada en los problemas que usan estos estadísticos es cierta, y si ella es planteada como una igualdad**. No sabemos qué tipos de distribuciones se den cuando las Hipótesis Alternativas sean ciertas o falsas; o las que aparezcan con Hipótesis Nulas falsas. Por eso, el esquema del modelo funciona alrededor de probar la falsedad de la Hipótesis Nula. Si los resultados de una investigación no prueban concluyentemente la falsedad de H_0 , no se la puede rechazar. H_0 es verdadera mientras no se

demuestre lo contrario. Si puede declararse H_0 falsa, entonces la hipótesis alternativa H_A es verdadera.

La SIGNIFICANCIA, α , es igual a la probabilidad representada por el área o intervalo de rechazo de la Hipótesis Nula H_0 . Puede decirse también que es el porcentaje de error considerado como aceptable de cometer cuando se rechaza una Hipótesis Nula, siendo ésta verdadera. El estadístico de prueba es “**significativo**” cuando puede adentrarse en la región de rechazo de H_0 lo suficiente como para poder rechazarla y aceptar H_A . El nombre “**SIGNIFICANCIA**” proviene de esta definición. En la administración, la industria y el ámbito científico se usa normalmente una significancia igual a 0,05. A veces 0,01.

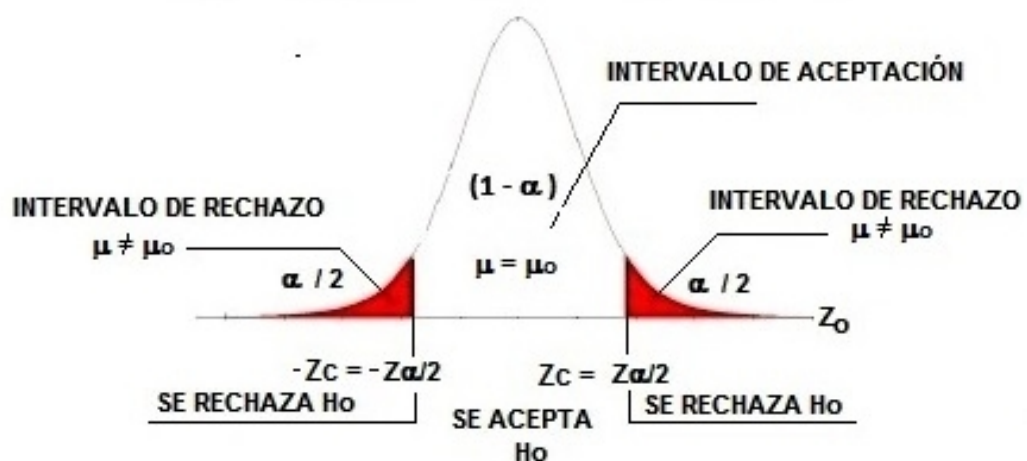


Figura 51:

HIPÓTESIS BILATERAL - ($H_A: \neq$) - DOS REGIONES DE RECHAZO

DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL ESTADÍSTICO DE PRUEBA Z_0

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Los estadísticos de prueba de las Pruebas de Hipótesis fueron escogidos porque siguen distribuciones de probabilidad conocidas cuando H_0 es verdad. En la Figura 51 el estadístico Z_0 (ver la fórmula correspondiente en la Tabla 19) es una variable aleatoria que sigue una distribución normal y por lo mismo debe concentrar sus mayores frecuencias alrededor del

centro del área total de probabilidad. Si ocurre que el valor del estadístico de prueba Z_o cae más allá de un área prefijada y razonable de aceptación (marcada por $-Z_c$ y Z_c a los dos lados), es porque la Hipótesis Nula en realidad no tiene una frecuencia de ocurrencia mayoritariamente central como exige la distribución normal, y ello sólo puede ocurrir si es que la Hipótesis Nula es falsa, por lo que debe ser rechazada.

En distribución bilateral del rango de rechazo, considerando que el estadístico se prueba simultánea y simétricamente a los dos lados, y que la significación se reparte en las dos colas, la condición para que ocurra la negación de H_o es:

$$|Z_o| > Z_c = Z_{\alpha/2}$$

En términos prácticos, la bilateralidad del Rango de Rechazo que se ve en la Figura 51, tiene que ver con el tipo “no es igual” de la Hipótesis Alternativa, pero los Intervalos de Rechazo pueden ser también unilaterales, de cola izquierda o derecha, como se ve en la Figura 52.

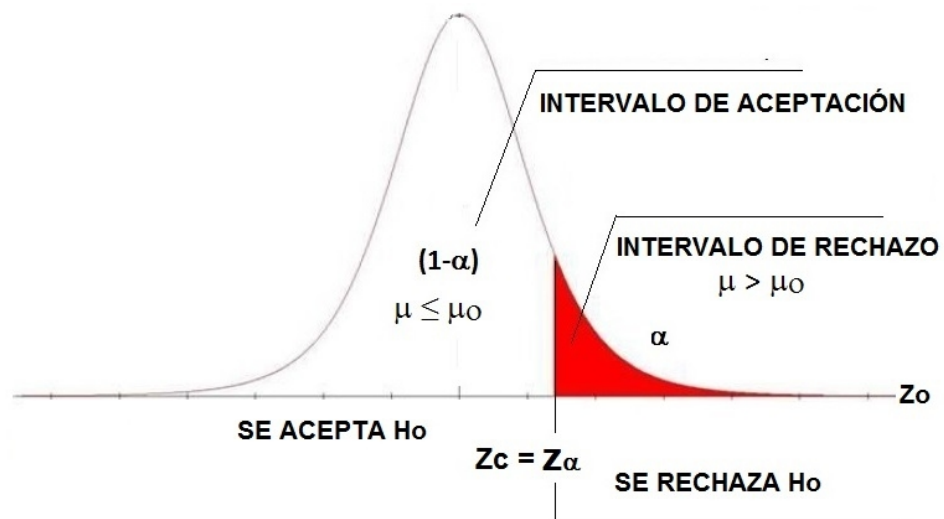


Figura 52:

HIPÓTESIS UNILATERAL - ($H_A: > < \mu$) - UNA REGIÓN DE RECHAZO

DISTRIBUCIÓN NORMAL DEL ESTADÍSTICO DE PRUEBA Z_o

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En este caso, en base a las observaciones disponibles, se establece a priori la Hipótesis Alternativa $H_A: \mu > \mu_0$, es decir que el parámetro poblacional μ es mayor que un valor de referencia μ_0 . Esta afirmación se demostrará como cierta si se puede rechazar H_0 con un grado aceptado de incertidumbre que es igual a α , como máximo. En la Figura 52, el estadístico de prueba Z_0 sigue una distribución normal y por tanto su frecuencia de ocurrencia debería concentrarse mayoritariamente alrededor del centro de la campana, a los dos lados y simétricamente. Eso significa que puede rechazarse H_0 si el estadístico de prueba se aleja mucho del centro de la campana, sea por el extremo izquierdo o por el extremo derecho.

Debe notarse que si en la situación $Z_0 > Z_c$ (que rechaza H_0 en el lado derecho de la curva) se reemplazan las expresiones contenidas en la Fórmula 23 se obtiene $\mu_0 > \mu_c$ (que significa $\mu > \mu_0 > \mu_c$), o sea lo que en realidad se quiere demostrar. Pero lo que ocurre en el lado izquierdo es lo contrario: Si $Z_0 < Z_c \Rightarrow \mu < \mu_0 < \mu_c$.

Fórmula 23

$$Z_0 = \frac{\bar{X} - \mu_0}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad Z_c = \frac{\bar{X} - \mu_c}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$$

De forma que, si se rechazara H_0 por la izquierda, debido a que Z_0 se aleja más de lo debido del centro de la campana por ese lado, ocurriría una paradoja: estaría bien rechazar H_0 porque no sigue las reglas de la distribución normal de probabilidades, pero no estaría bien rechazarla porque ello significa aceptar que $\mu < \mu_0 < \mu_c$, cuando su rechazo debería significar

$\mu > \mu_0 > \mu_c$. Como por abajo el rechazo de H_0 no funciona, se concentra el rechazo solamente en la cola derecha. El acuerdo es rechazar H_0 porque es falsa.

En distribución unilateral derecha del rango de rechazo, considerando toda la significación a la derecha, la condición para que ocurra la negación de H_0 es:

$$Z_0 > Z_c = Z_\alpha$$

En distribución unilateral izquierda del rango de rechazo, considerando toda la significación a la izquierda, la condición para que ocurra la negación de H_0 es:

$$Z_0 < Z_c = -Z_\alpha$$

A la probabilidad de rechazar H_0 cuando es ella es falsa se le conoce como **potencia de la prueba**, y se define como $(1-\beta)$. De donde se sigue que β es la probabilidad de aceptar H_0 siendo falsa. Esta situación se conoce como **Error tipo II**. En contraposición, un **Error tipo I** es la probabilidad de rechazar H_0 siendo verdadera. La potencia de la prueba puede incrementarse con el uso de muestras de tamaño grande.

En general, se considera que cometer un Error tipo I es más grave que cometer un Error tipo II, porque el rechazar H_0 siendo verdadera en la mayoría de los casos significa no respetar la defensa de algo convencional, que ha ocurrido normalmente, y con lo que se ha podido trabajar y vivir, a cambio de adoptar otra situación de trabajo basada en la propuesta de H_A , propuesta que ha resultado no ser cierta. Es cambiar lo probado y seguro por algo prometedor, pero basado en un error. Mientras que cometer un Error tipo II, aceptar H_0 siendo falsa, significa en el peor de los casos nada más que no aceptar una posibilidad de mejora, y seguir como siempre: ya vendrá el cambio después. Por eso, es común que se controle los Errores tipo I, dejando libres

los Errores tipo II, como si no importaran. Además, se asegura, controlar los Errores tipo II significa el uso de grandes tamaños muestrales, lo cual siempre es caro.

3.2.3.1. Significancia Observada vs Significancia Predefinida: Valor-P (*p-value*)

La manera descrita más arriba de rechazar la Hipótesis Nula, a través de demostrar que el estadístico de prueba es lo suficientemente significativo como para “meterse” en el área de rechazo de H_0 y demostrar así que ella es falsa, adolece de una falla fundamental: no ofrece al analista información respecto de si el estadístico de prueba sólo llegó a alcanzar la región en disputa o se adentró bastante en ella. En el problema propuesto de la Tabla 19 puede verse que se rechaza H_0 porque el estadístico de prueba Z_0 se calcula igual a -1.75, menor que el valor crítico Z_c , que marca la frontera del área de rechazo izquierda, y es igual a -1.64 (este último valor se puede encontrar en la tabla de áreas bajo la curva de la distribución Normal del ANEXO 17, para $\alpha=0,05$). Además de que estos dos valores no informan respecto de la contundencia con que se rechaza H_0 , la decisión misma de utilizar una significancia igual al 5%, o a cualquier otro porcentaje, puede resultar insatisfactoria para otras personas encargadas de tomar decisiones.

Para evitar esas limitaciones, actualmente se ha adoptado ampliamente el enfoque del **valor-P o *p-value***. El uso de este criterio se ha difundido gracias a que las modernas herramientas informáticas permiten integrar cualquier función de densidad de probabilidad, y calcular cualquier área bajo la curva, cuando ellas no son precisamente especificadas por las tablas disponibles. Lo hacen aunque sea de forma aproximativa, pero muy exacta.

El **valor-P o *p-value*** equivale a la “significancia observada” y se la ha definido de varias formas, aunque la forma esquemática de representarla se ve en la Figura 53. Se usa para la explicación el estadístico de prueba Z_0 .

Entre Z_{01} y Z_{05} se encuentra el área de probabilidad definida por el estadístico de prueba, con los límites capaces de “meterse” en la región de rechazo de la Hipótesis Nula e invalidarla. Como se trata de un problema de dos colas, la expresión para Z_0 de la Fórmula 23 tiene signos positivo y negativo. La significancia se reparte por igual entre las dos colas. El área de probabilidad entre Z_{01} y Z_{05} es igual la integral de la función de densidad de la distribución Normal entre esos los límites. Existen varios métodos aproximativos para hallar esa integral, de los cuales uno de los más sencillos y exactos es el método de Hastings, presentado en 1.955 y ampliamente usado hoy en día en computadores y calculadoras (Ver Fórmula 24).

Fórmula 24

INTEGRACIÓN DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD NORMAL

METODO DE HASTINGS

$$f(Z) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Z^2}{2}} (b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + b_4 t^4 + b_5 t^5)$$

$$\begin{array}{llll} t=1/(1+pZ) & b_1=0.319381530 & b_3=1.781477937 & b_5=1.330274429 \\ p=0.2316419 & b_2=-0.356563782 & b_4=-1.821255978 & \end{array}$$

El error en la aproximación es menor que 7.5×10^{-8}

Mientras más grande sea el área de integración, mayor es la probabilidad de anular H_0 y aceptar H_A . Otra cosa que ocurre al crecer el área de integración es que las colas que deja a los extremos son más pequeñas, pudiendo llegar a ser más pequeñas que las correspondientes a las regiones de rechazo de la Hipótesis Nula.

A la suma de área de las colas que deja el área de probabilidad definida entre Z_{01} y Z_{05} se le llama Valor-P o *p-value*. En este caso, por tratarse de dos colas, el Valor-P se divide para dos. Si se tratara de una sola el Valor-P no tiene por qué dividirse. Resulta evidente que si el Valor-p (*p-value* o significancia observada) es menor que la significancia predefinida α - normalmente igual a 0,05- entonces se puede rechazar H_0 .

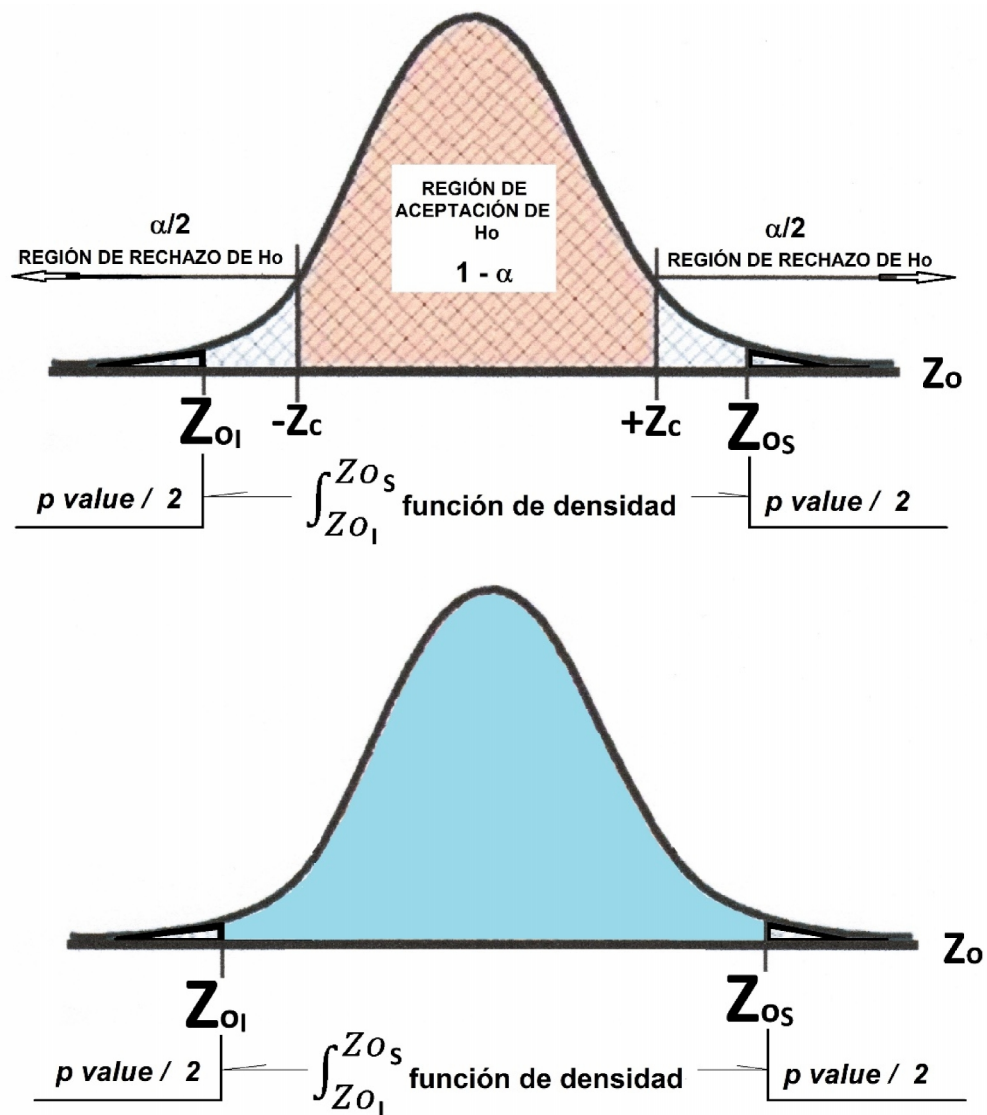


Figura 53: VALOR P - p value

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

La condición de rechazo es, entonces, $p\text{-value} < \alpha$, sea la cual sea el valor de α adecuado para quien toma la decisión en el análisis. El Valor-P es proporcionado directamente por varios software estadísticos como el Minitab, StatGraphics y Desing Expert, o se puede calcular con ayuda del Excel. En la dirección <http://graphpad.com/quickcalcs/PValue1.cfm> también se lo puede encontrar.

Resumiendo los criterios de rechazo basados en Z_o y en el Valor-P son los siguientes:

Tabla 18:
CRITERIOS DE RECHAZO

REGIÓN DE RECHAZO	RECHAZO POR Z_o	RECHAZO POR VAPOR-P
BILATERAL	$ Z_o > Z_C = Z_{\alpha/2}$	VALOR P (DE 2 COLAS) $< \alpha$
COLA IZQUIERDA	$Z_o < Z_C = -Z_{\alpha}$	VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$
COLA DERECHA	$Z_o > Z_C = Z_{\alpha}$	VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En la Tabla 18 se señala “VALOR P (DE DOS COLAS)” porque usualmente los programas informáticos disponibles proporcionan el Valor-P suponiendo que el valor de Z_o que se les entrega está dispuesto a izquierda y derecha del eje central de la campana 1. Esta misma tabla sirve para las otras distribuciones de probabilidad usadas en Pruebas de Hipótesis, sólo que en lugar de Z_o , se tendrá χ_o^2 , t_o y F_o .

Las fórmulas desarrolladas para calcular los estadísticos de prueba usados en las Pruebas de Hipótesis son los siguientes:

3.2.3.2. Pruebas de Hipótesis para una muestra

Tabla 19:
Pruebas de hipótesis Z para una muestra - para σ conocida

μ_o = Valor de media poblacional que sirve de referencia para la propuesta realizada sobre μ .

CASO	HIPÓTESIS NULA	HIPÓTESIS ALTERNATIVA	TIPO DE COLA	ESTADÍSTICO DE PRUEBA	CRITERIOS DE RECHAZO
1	$H_o : \mu = \mu_o$	$H_A : \mu \neq \mu_o$	Dos colas	$Z_o = \frac{\bar{X} - \mu_o}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$	$ Z_o > Z_C = Z_{\alpha/2}$ VALOR P (DE 2 COLAS) $< \alpha$
2	$H_o : \mu \geq \mu_o$	$H_A : \mu < \mu_o$	Cola Izquierda		$Z_o < -Z_C = -Z_{\alpha}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$
3	$H_o : \mu \leq \mu_o$	$H_A : \mu > \mu_o$	Cola Derecha		$Z_o > Z_C = Z_{\alpha}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$


ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

\bar{X} = Media de la muestra

σ = Desviación Estándar conocida de la población.

Z_o = Estadístico de prueba, calculado con los datos de la observación.

Z_c = Valor de Z calculado para el nivel de significancia especificado.

PROBLEMA	H1	Ho	Z_o y Z_c	REGION DE RECHAZO
(CASO 2) Una muestra de 25 barras de acero presenta una media $\bar{X}=2,73$ pies, menor a la especificación de mínimo 2,8 pies con una desviación estándar de 0,2 pies ¿Puede afirmarse con una significancia del 5% que μ está bajo la especificación?	$H_A : \mu < 2,8$ Es lo que "parece" por los datos con que se cuenta	$H_o : \mu \geq 2,8$	$\mu_o = 2,8$ $\bar{X}=2,73$ $Z_o = -1,75$ $Z_c = -1,64$ Se rechaza H_o p-value = 0,0401 < 0,05	 $\alpha = 0,05$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Tabla 20:

Pruebas de hipótesis t para una muestra – para σ desconocida


CASO	HIPÓTESIS NULA	HIPÓTESIS ALTERNATIVA	TIPO DE COLA	ESTADÍSTICO DE PRUEBA	CRITERIOS DE RECHAZO
1	$H_o : \mu = \mu_o$	$H_A : \mu \neq \mu_o$	Dos colas	$t_o = \frac{\bar{X} - \mu_o}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$	$ t_o > t_c = t_{\alpha/2}$ VALOR P (DE 2 COLAS) < α
2	$H_o : \mu \geq \mu_o$	$H_A : \mu < \mu_o$	Cola Izquierda		$t_o < -t_c = -t_\alpha$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 < α
3	$H_o : \mu \leq \mu_o$	$H_A : \mu > \mu_o$	Cola Derecha		$t_o > t_c = t_\alpha$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 < α

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

μ_o = Valor de media poblacional que sirve de referencia para la propuesta realizada sobre μ .

t_o = Estadístico de prueba, calculado con los datos de la observación.

t_c = Valor de t calculado para el nivel de significancia especificado.

PROBLEMA	H1	Ho	t _o y t _c	REGION DE RECHAZO
(CASO 3) Una muestra de 13 baterías presenta un promedio de vida $\bar{X}=496,54$ horas, con una varianza $S=202,17$ horas. ¿Puede afirmarse con un 5% de significancia que la vida media poblacional μ es mayor a 400 horas?	H_A : $\mu > 400$ Es lo que "parece" por los datos con que se cuenta	H_o : $\mu \leq 400$	$\mu_o = 400$ $\bar{X}=496,54$ gl = 12 $t_o = 1,72$ $t_c = 1,78$ No se rechaza H _o $\frac{p\text{-value}}{2} = 0,0556 > 0,05$	 $\alpha = 0,05$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Tabla 21:
Pruebas de hipótesis Z para Proporciones

CASO	HIPÓTESIS NULA	HIPÓTESIS ALTERNATIVA	TIPO DE COLA	ESTADÍSTICO DE PRUEBA	CRITERIOS DE RECHAZO
1	$H_o : \pi = \pi_o$	$H_A : \pi \neq \pi_o$	Dos colas	$Z_o = \frac{p - \pi_o}{\sqrt{\frac{\pi_o(1-\pi_o)}{n}}}$	$ Z_o > Z_C = Z_{\alpha/2}$ VALOR P (DE 2 COLAS) $< \alpha$
2	$H_o : \pi \geq \pi_o$	$H_A : \pi < \pi_o$	Cola Izquierda		$Z_o < -Z_C = -Z_{\alpha}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$
3	$H_o : \pi \leq \pi_o$	$H_A : \pi > \pi_o$	Cola Derecha		$Z_o > Z_C = Z_{\alpha}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$


ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

π_o = Valor de proporción poblacional que sirve de referencia para la propuesta realizada sobre π .

p = Proporción conocida de la población.

Z_o = Estadístico de prueba, calculado con los datos de la observación.

Z_C = Valor de Z calculado para el nivel de significancia especificado.

PROBLEMA	H1	Ho	Z _o y Z _c	REGION DE RECHAZO
(CASO 2) La tasa de compra para visitantes por Internet al sitio WEB era del 10,1%. Después de una mejora de la página, de 200 visitantes 24 hicieron al menos una compra. Con una significancia del 5%, puede afirmarse que la tasa mejoró?	H_A: $\pi > 0,101$ Es lo que "parece" por los datos con que se cuenta	H_o: $\pi \leq 0,101$	$\pi_o = 0.101$ $p=0,12$ $n=200$ <hr/> $Z_o = 0,89$ $Z_c = 1,64$ No se rechaza H _o <hr/> $p\text{-value}/2 = 0,1868 > 0,05$	 $\alpha = 0,05$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

3.2.3.3. Pruebas de Hipótesis para dos muestras

Tabla 22:

Prueba Z para dos muestras - para σ conocida

CASO	HIPÓTESIS NULA	HIPÓTESIS ALTERNATIVA	TIPO DE COLA	ESTADÍSTICO DE PRUEBA	CRITERIOS DE RECHAZO
1	$H_o : \mu_1 = \mu_2$	$H_A : \mu_1 \neq \mu_2$	Dos colas	$Z_o = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$	$ Z_o > Z_c = Z_{\alpha/2}$ VALOR P (DE 2 COLAS) $< \alpha$
2	$H_o : \mu_1 \geq \mu_2$	$H_A : \mu_1 < \mu_2$	Cola Izquierda		$Z_o < -Z_c = -Z_{\alpha}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$
3	$H_o : \mu_1 \leq \mu_2$	$H_A : \mu_1 > \mu_2$	Cola Derecha		$Z_o > Z_c = Z_{\alpha}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

\bar{X}_1 = Media de la muestra 1

\bar{X}_2 = Media de la Muestra 2

σ_1 = Desviación Estándar conocida de la población 1.


σ_2 = Desviación Estándar conocida de la población 2.

n_1 = Tamaño de la muestra 1

n_2 = Tamaño de la Muestra 2

Z_o = Estadístico de prueba, calculado con los datos de la observación.

Z_c = Valor de Z calculado para el nivel de significancia especificado.

PROBLEMA	H1	Ho	Z _o y Z _c	REGION DE RECHAZO
(CASO 2) Se desea evaluar la compra de una nueva máquina de presión. σ poblacional de la antigua máquina es igual a 10, y de la nueva máquina es 9. La media muestral para $n=100$ de la máquina antigua es 65 y para igual muestra la nueva da 72. ¿Con $\alpha=0,01$ existe evidencia de que conviene la nueva compra?	HA : $\mu_1 < \mu_2$ Es lo que "parece" por los datos con que se cuenta	Ho : $\mu_1 \geq \mu_2$	$\mu_1 = \mu_2$ $Z_c = -2,33$ $Z_o = -5,203$ Se rechaza Ho <hr/> $p\text{-value}/2 = 0,0001 < 0,01$	 $\alpha = 0,01$

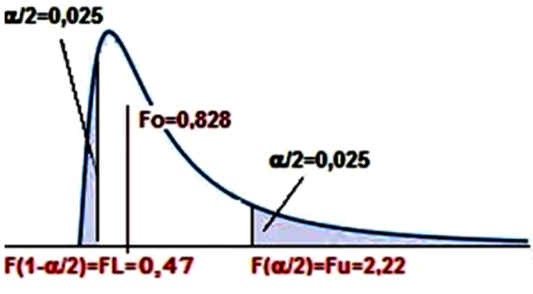
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Tabla 23:**Prueba F para Varianzas - $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$**

CASO	HIPÓTESIS NULA	HIPÓTESIS ALTERNATIVA	TIPO DE COLA	ESTADÍSTICO DE PRUEBA	CRITERIOS DE RECHAZO
1	$H_0 : \sigma^2_1 = \sigma^2_2$	$H_A : \sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$	Dos colas	$F_o = \frac{s_1^2}{s_2^2}$	$F_o > F_{\alpha/2}$ o $F_o < F_{(1-\alpha/2)}$ VALOR P (DE 2 COLAS) $< \alpha$
2	$H_0 : \sigma^2_1 \geq \sigma^2_2$	$H_A : \sigma^2_1 < \sigma^2_2$	Cola Izquierda		$F_o < F_{(1-\alpha/2)}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$
3	$H_0 : \sigma^2_1 \leq \sigma^2_2$	$H_A : \sigma^2_1 > \sigma^2_2$	Cola Derecha		$F_o > F_{\alpha/2}$ VALOR P (DE 2 COLAS)/2 $< \alpha$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

 S^2_1 = Varianza Muestral de la población 1. S^2_2 = Varianza Muestral de la población 2. n_1 = Tamaño de la muestra 1 n_2 = Tamaño de la Muestra 2

PROBLEMA	H1	Ho	F_U, F_L y F_o	REGION DE RECHAZO
(CASO 1) Existen dudas sobre la homogeneidad de dos líneas de producción en una fábrica. Se toma una muestra de 33 elementos de la línea 1 y se halla una varianza de 21, y una muestra de 24 elementos de la línea 2 calculándose una varianza de 25,36. ¿Con una significancia del 5%, existe evidencia de dispersión?	$H_A: \sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$	$H_o: \sigma^2_1 = \sigma^2_2$	$gl_1 = 32$ $gl_2 = 23$ <hr/> $F_U = F_{\alpha/2} = 2,22$ $F_L =$ $F_{(1-\alpha/2)} = 0,4725$ $F_o = 0,8281$ No se rechaza H_o <hr/> $p\text{-value} = 0,6930 > 0,05$	 <p> FL.- F INFERIOR FU.- F SUPERIOR $\alpha = 0,05$ </p>

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

La media de una muestra o las medias de un grupo de muestras no dicen mucho por sí solas. Más aun tratándose de procesos, cuando sobretodo interesa la variabilidad de las salidas. Se sobreentiende que quien maneja un proceso tratará de acercar la media de las salidas lo más posible a la especificación entregada por el cliente o por la gerencia; y puede ser que logre aproximar el promedio a lo especificado, aunque sea a costa de desperdicios y reprocesos, o aceptando quejas y devoluciones. Pero es la variabilidad la que habla de lo bien o mal que se hace el trabajo. Es decir de lo buena o mala que es la calidad, y de lo bajo o alto que es el costo implicado en alcanzarla. Desde el punto de vista de los procesos, una salida con la media más alejada de la especificación, pero con menor varianza, puede resultar mejor que una salida con la media más cercana a la especificación, pero con mayor varianza. De la misma manera, para n muestras con medias similares, posiblemente sea más importante demostrar que las varianzas σ son (o no) iguales a demostrar que las medias μ son (o no) iguales, si de hecho cualquier prueba que se haga para demostrar igualdad de medias poblacionales se la emprende porque las medias muestrales están parecidas.

Los promedios de n muestras pueden parecerse, pero eso no significa que provengan de poblaciones con varianzas también similares. Si las varianzas poblacionales se parecen, con un grado de confianza α especificado, entonces se puede asegurar que ese es el porcentaje máximo de variación del proceso. Si las varianzas no se parecen, dentro del rango de confianza especificado, significa que la variación del proceso es inaceptable para ese α . La prueba F realiza ese trabajo para dos muestras. Otras técnicas como el Contraste de Bartlett y el Contraste de Harley pueden contrastar la varianza de n muestras independientes.

Existen otras Pruebas de Hipótesis para dos muestras que sirven para comparar dos medias poblacionales o dos proporciones poblacionales (las fórmulas de los estadísticos pueden verse en el ANEXO 23):

Prueba t para dos muestras con σ_1 y σ_2 desconocidas, pero que se asume son iguales.

Prueba t para dos muestras con σ_1 y σ_2 desconocidas, y que no puede asumirse son iguales.

Prueba t para dos muestras pareadas. En este caso, las dos muestras tienen algo en común, por lo que no pueden considerarse independientes. Por ejemplo, la comparación del efecto de dos medicamentos analgésicos aplicados a un mismo paciente (se comparan las eficiencias de los dos medicamentos, pero las muestras no son independientes al proceder de la misma persona). Igual ocurre cuando se quiere comparar las mediciones de las durezas reportadas por dos aparatos que han sido probados actuando sobre la misma pieza metálica.

Prueba Z para dos muestras con π_1 y π_2 desconocidas.

3.2.3.4. Pruebas para más de dos muestras: ANOVA

El ANOVA o Análisis de la Varianza (Analysis of Variance) tiene como misión básica contrastar la igualdad de medias de n muestras de igual varianza, es decir que presentan homoscedasticidad. En el ámbito de los procesos, el requisito de muestras con varianzas similares no es tan difícil cumplir, pues la libre competencia de mercado garantiza la provisión de maquinarias, materiales, mano de obra, metodologías y otras entradas de los procesos con características similares, a fin de ser capaces de hallar su espacio en la preferencia de adquisición de los clientes que las demandan.

El ANOVA es la técnica principal en el análisis de datos experimentales, y puede trabajar con cualquier cantidad de muestras procedentes de cualquier cantidad de variaciones de un mismo proceso. Cada muestra puede tener una cantidad n de datos.

El ANOVA DE UNA VÍA es la modalidad más simple de esta técnica. En este caso se analiza la igualdad (o desigualdad) de medias de las salidas de un proceso cuando existe un solo factor de entrada, y éste se varía entre t niveles (Ver Figura 54).

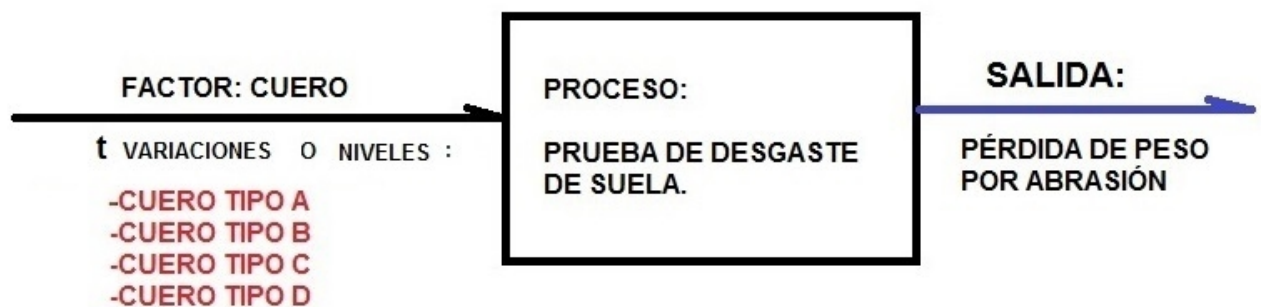


Figura 54: Proceso con un solo factor de entrada - 4 niveles

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En el caso de la Figura 54, de cada una de las t variaciones o niveles del factor único (Cuero A, Cuero B, Cuero C o Cuero D) se pueden tomar muestras de n elementos cada una. Por tanto, habrá $N = (tn)$ elementos u observaciones. Como el ANOVA es básicamente una prueba

de hipótesis F, entonces se trata con grados de libertad que tienen que ver con los t niveles y las N observaciones.

En el ANEXO 15 se puede ver un ejemplo con valores numéricos para el caso de la Figura 54, cuando se han realizado seis observaciones para cada tipo de cuero ensayado en la máquina de abrasión. Allí se puede estudiar el procedimiento ANOVA para ese problema en particular y las fórmulas que permiten encontrar si es que los promedios de desgaste son significativamente diferentes para cada tipo de cuero.

El fondo conceptual del procedimiento que se ve en el ANEXO 15 tiene que ver la propiedad que tiene la variación total de las salidas de un proceso de poder descomponerse en la suma de dos variaciones: la variación entre niveles (tipos de cuero) y la variación intra nivel (entre las observaciones de la misma muestra del mismo cuero).

$$\text{Variación TOTAL} = \text{Variación entre tipos de cuero} + \text{Variación intra observaciones del mismo cuero}$$

Para que la variación de los tipos de cuero sea significativa en los resultados de salida de la prueba de desgaste, la fuente de variación “ENTRE” debe ser significativamente mayor que la variación “INTRA”. Esto es así porque el segundo tipo de variación es básicamente una fuente de ERROR debido a pequeñas distorsiones en el proceso de muestreo (diferentes dureza y humedad locales del cuero, diferente colocación en la máquina de abrasión, diferente desgaste del disco abrasivo, diferente operador de la máquina, etc.). Si es que la variación “INTRA” fuera comparativamente mayor, entonces eso significaría que las medias poblacionales de desgaste de los diferentes tipos de cuero son estadísticamente similares.

El ANOVA tiene modalidades más complejas, conforme las entradas al proceso se complican, pero en lo que a este trabajo se refiere, no se analizarán más procedimientos manuales para la resolución de las diferentes modalidades de ANOVA que se requieren en la mejora de procesos, si no que se recurrirá a software especializado en realizar tal tarea.

Es importante resaltar el uso del ANOVA en el análisis de experimentos controlados, en los que los factores de entrada del proceso pueden variarse sistemáticamente a fin de alterar las salidas y medir su variación consecuente. De esta manera se puede verificar si las variaciones de los factores de entrada son lo suficientemente significativas como para alterar las salidas que antes venían ocurriendo. Esto es muy importante cuando se quiere controlar los factores que realmente pueden causar una variación potencial en las salidas de un proceso. Cuando se quieren controlar los “factores significativos”.

En procesos, los factores que dan por resultado la salida pueden identificarse con las “Seis Ms” que se ven en la Figura 27. La salida es siempre una variable cuantitativa, pero las entradas pueden ser variables cuantitativas, variables cualitativas o una mezcla de esos dos tipos de variables.

En el ANOVA se presupone la existencia de una relación lineal entre los factores de entrada y la salida. Es decir que el cambio de la magnitud de un factor (o de un conjunto de factores) ocasiona una variación directamente proporcional en la salida. En condiciones ideales, las variaciones de la salida deberían depender sólo de la acción de los factores de entrada y de sus diferentes niveles de variación, así como de la interacción entre esos factores (Variación ENTRE). La variación debida a errores en el muestreo, es decir la Variación INTRA debería tender a cero. Una expresión usada en el análisis de experimentos controlados es:

$$\text{SALIDA} = \text{MEDIA } \mu \text{ DE SALIDA} + \text{EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LOS FACTORES} + \text{ERROR}$$

La media de la SALIDA es una constante del proceso, pues le apunta a la especificación. El ERROR es también una constante debida a causas naturales del proceso, que si bien se puede disminuir nunca puede anularse totalmente. Son los efectos de las VARIACIONES DE LOS FACTORES los que realmente interesan. Por eso, la expresión se reduce a:

$$\text{SALIDA} = \text{EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LOS FACTORES} + \text{CONSTANTE}$$

Evidenciándose así que lo que realmente interesa es medir el efecto neto de las variaciones de los factores y entre los factores. Otra expresión usada es:

$$\text{VALOR OBSERVADO} = \sum \text{EFECTOS ATRIBUIBLES} + \sum \text{EFECTOS NO ATRIBUIBLES (RESIDUALES)}$$

Donde el Valor Observado es la salida, los Efectos Atribuibles son cantidades resultantes de las variaciones de los Factores y los Efectos No Atribuibles a ningún factor se denominan Efectos Residuales.

No deben confundirse los conceptos de Efectos Atribuibles y No Atribuibles que actúan sobre la salida de un proceso con las Causas Asignables y No Asignables que determinan la variabilidad de la salida del proceso. Son ámbitos de trabajo diferentes.

Aparte de que el ANOVA se aplica para procesos en los cuales existe linealidad entre la variación de los factores y su efecto en la salida, debe tenerse presente que esta técnica funciona adecuadamente siempre y cuando se cumplan algunos supuestos respecto de los datos experimentales y respecto del error resultante de los efectos no atribuibles:

RESPECTO DE LOS DATOS EXPERIMENTALES:

- Deben seguir una distribución normal de probabilidades
- Deben presentar varianzas similares
- Deben ser independientes, es decir obtenidos de manera aleatoria.

RESPECTO DE LOS EFECTOS RESIDUALES:

- Deben tender a cero
- Deben ser independientes entre ellos
- Es deseable que sigan una distribución normal
- Es deseable que tengan varianzas similares

3.2.3.5. Prueba LSD

El ANOVA DE UNA VÍA, que se ejemplifica como la modalidad más simple de esta técnica, permite aceptar o rechazar la Hipótesis Nula que plantea la igualdad de las medias de los t niveles del factor único. En el caso desarrollado en el ANEXO 15 se rechazó H_0 y así se determinó que el factor cuero es significativo porque algún par de medias (sin saber cuáles exactamente) son diferentes entre sí. Ahora, el asunto es ver cuáles niveles son los significativamente diferentes.

Las técnicas existentes utilizan la comparación por parejas de medias, de todas las combinaciones posibles de tratamientos, de dos en dos. En el ejemplo del ANEXO 15 se compararían las parejas μ_A vs. μ_B ; μ_A vs. μ_C ; μ_A vs. μ_D ; μ_B vs. μ_C ; μ_B vs. μ_D y μ_C vs. μ_D . Son un total de 6 comparaciones. Generalizando, para K tratamientos ($K = t$ en Anova de Una Vía) se tienen $[K * (K-1)] / 2$ pares de medias a comparar. Como prueba de hipótesis, el planteamiento es:

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j$$

$$\text{Para toda } i \neq j$$

Para efectuar las comparaciones se han desarrollado varios métodos que se diferencian en su potencia para detectar las más pequeñas diferencias de medias. Están el método LSD, el método de Tukey y el método de Duncan. El método más usado es el primero. Existen también ayudas gráficas como el Diagrama de Cajas, la Gráfica de Medias, el Diagrama Simultáneo de Cajas y la Gráfica de Podios.

La prueba LSD se aplica a procesos que tienen un solo factor principal de entrada, y hasta tres factores secundarios, según los procedimientos del Diseño Experimental. Cuando se

trata con procesos que tienen dos o más factores principales de entrada, no se usa la prueba LSD, si no otras técnicas como las Gráficas de Interacción.

El estadístico utilizado para el Anova de Una Vía, cuando se trata con un solo factor como entrada al proceso, se ve en la Fórmula 25. En primer lugar está la expresión cuando los diferentes tratamientos han sido probados con diferentes números de observaciones cada uno. Más abajo está la expresión para un diseño balanceado, es decir cuando el número de observaciones para todos los tratamientos es el mismo.

Fórmula 25

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{CM_E \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}$$

$$LSD = t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{2CM_E/n}$$

CM_E es el Cuadrado Medio del Error, y puede verse en la Tabla Anova. El estadístico sigue una distribución t de dos colas (α se distribuye entre las dos colas), con grados de libertad igual a (N-K). Se usa la distribución t porque los errores o efectos residuales siguen una distribución normal, y normalmente se cuenta con menos de 30 observaciones por nivel. El valor absoluto de la diferencia de cada par de medias muestrales se compara con el valor calculado para LSD. Si el valor absoluto de una diferencia de medias en particular es mayor que el valor LSD, se la considera significativa. En el ANEXO 16 se puede ver un ejemplo de aplicación de la técnica LSD, donde se comparan cuatro diferentes métodos de ensamble para una pieza, donde los tiempos requeridos se expresan en minutos:

Tabla 24:

Ejemplo de tiempos para métodos de ensamble

NIVELES	OBSERVACIONES				PROMEDIOS
A	6	8	7	8	7,25
B	7	9	10	8	8,5
C	11	16	11	13	12,75
D	10	12	11	9	10,5

FUENTE: Gutiérrez, H., y de la Vara, R.(2008). **Análisis y diseño de experimentos.** México,D.F.; McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.

Con el método LSD se demuestra, con un 95% de confianza, que existen diferencias significativas entre las medias: A≠C, A≠D y B≠C. Entre A y B no existe diferencia significativa, o al menos ella no es detectada por este método. Basados en los números de la Tabla 24 podría decirse que el mejor método de ensamble es el método A, pero es mejor contar con otros tipos de ayuda que permitan tomar una decisión. Esa ayuda la constituyen los Métodos Gráficos.

3.2.3.6. Métodos Gráficos para diferencias significativas

GRÁFICO DE MEDIAS.-

Utiliza intervalos definidos por la expresión:

Fórmula 26

$$\bar{x}_i \pm t_{\alpha/2, N-k} \sqrt{\frac{CM_E}{n_i}}$$

La media de cada nivel está en la mitad del intervalo. Se grafican los intervalos, y si dos de ellos se traslapan, eso quiere decir que no existe diferencia significativa entre ellos. Si no se traslapan, es una pareja para la cual las poblaciones de los niveles respectivos presentan una diferencia estadística entre sus medias.

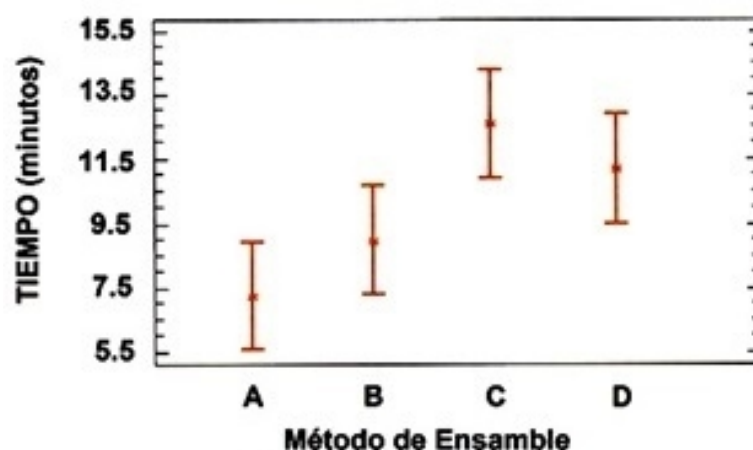


Figura 55: Gráfico de medias utilizando el LSD

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En la Figura 55 puede verse que el método de ensamble A presenta la mejor media, pero no tiene diferencia significativa con el método B, pues se traslapan los intervalos. Se necesitan más argumentos para decidir entre A y B, y para ello puede ser útil del Diagrama de Cajas (Box & Whisker).

DIAGRAMA SIMULTÁNEO DE CAJAS.-

El Diagrama de Cajas es un recurso estadístico basado en cuartiles. Con la ayuda del MINITAB, se pueden hallar las medidas de posición y construir la siguiente tabla:

Tabla 25:
Datos para diagrama de cajas

MÉTODO DE ENSAMBLE	MEDIA	MEDIANA	Q1	Q3	X mínimo	X máximo
A	7,25	7,50	6,25	8,00	6,00	8,00
B	8,50	8,50	7,25	9,75	7,00	10,00
C	12,75	12,00	11,00	15,25	11,00	16,00
D	10,50	10,50	9,25	11,75	9,00	12,00

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Con los valores de la Tabla 25 se puede construir el Diagrama Simultáneo de Cajas, que se puede ver en la Figura 56. Este diagrama ofrece una perspectiva interesante en la comparación de los niveles de un factor porque, además de que presenta las diferencias significativas entre las medias poblacionales: $A \neq C$, $A \neq D$ y $B \neq C$, y además de que indica el método con el menor tiempo para el proceso (A), permite ver el método con mayor o menor dispersión (o sea variabilidad), y lo que es muy importante, el método que se acerca más a una distribución normal (mediana = media). En ese sentido, el método B es ligeramente mejor que el método A, del cual no se diferencia en términos estadísticos. Para tomar una decisión final, se deberían recolectar más datos que permitan incrementar la potencia de la prueba.

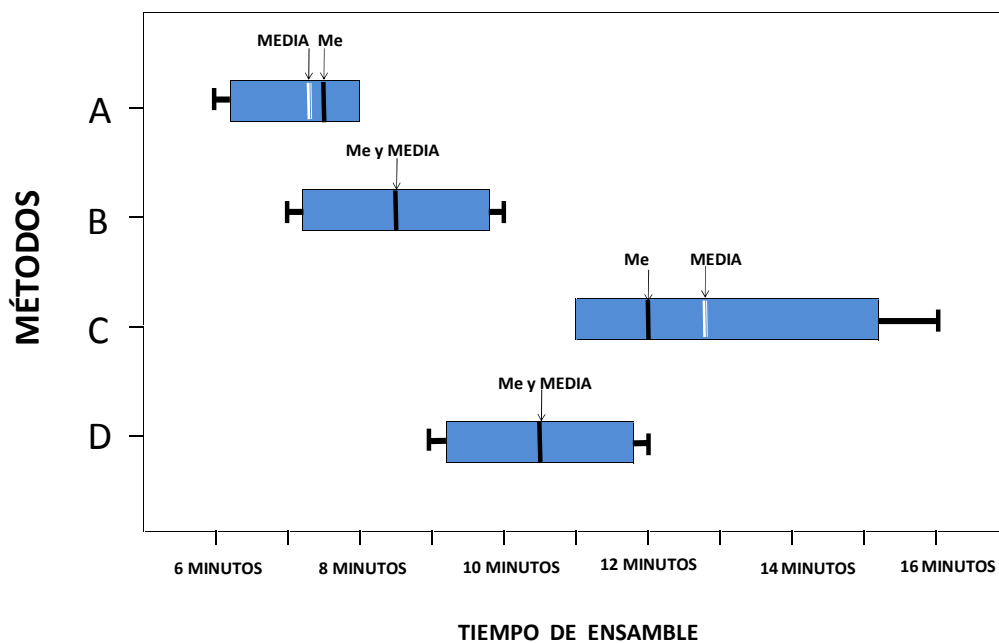


Figura 56:

DIAGRAMA SIMULTÁNEO DE CAJAS - MÉTODOS DE ENSAMBLE

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

DIAGRAMA DE PÓDIUM.-

El Diagrama de Pódium es el más simple de los tres métodos gráficos expuestos. En el escalón superior se coloca el método de ensamble (o el nivel de factor) con la mejor media. En el

problema que se está desarrollando, mientras menos-mejor, pues lo que conviene son los menores tiempos de ensamble. Por eso, el método de ensamble A está en el primer escalón desde arriba.

En cada escalón se ponen los niveles sin diferencia significativa, o al extremo izquierdo, si un nivel no tiene diferencia significativa con otro nivel que está en un escalón más bajo. El diagrama puede verse en la Figura 57.

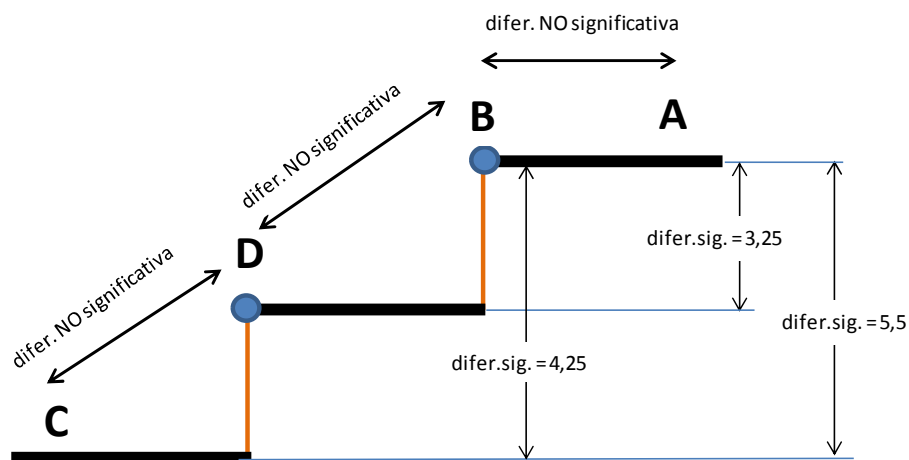


Figura 57:

Diagrama de Pódium

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

3.2.4. CARTAS O DIAGRAMAS DE CONTROL USADAS POR SEIS SIGMA

Los Diagramas o Cartas de Control permiten estudiar la variabilidad de los procesos a través del tiempo. Ya se mencionó previamente que todo proceso presenta variaciones que no pueden ser eliminadas totalmente, aunque sí disminuidas como para garantizar un nivel de calidad competitivo del producto de salida.

La variabilidad se origina en CAUSAS COMUNES (aleatorias o no predecibles) y en CAUSAS ESPECIALES (no aleatorias o predecibles). Las Causas Comunes provienen de variaciones naturales de las 6 M's: las máquinas se desgastan, los hombres se cansan o mantienen bien su

desempeño, las materias primas llegan inevitablemente con imperceptibles defectos, el clima cambia de un día a otro, los métodos no siempre se siguen de manera estricta. Mientras un proceso varíe sólo por Causas Comunes, se dice que está bajo CONTROL ESTADÍSTICO, y es importante detectarlo así, a fin de que los técnicos y gerentes entiendan que los resultados diferentes de un lote a otro o de un período de tiempo a otro, pero bajo control estadístico respecto del proceso que los origina, no deben causar alboroto alguno, reclamos injustificados, o decisiones heroicas y apresuradas. El proceso varía porque debe variar. Lo ideal es que varíe siguiendo una campana de Gauss lo más estrecha posible. Si no es así, algo está mal. Incluso si se encontrara una variación igual a cero, algo estaría mal: el mundo real no trabaja de esa manera.

Lo que interrumpe el CONTROL ESTADÍSTICO de un proceso es la aparición de las CAUSAS ESPECIALES, aquellas que no son inherentes de manera permanente al proceso: una máquina que se daña, un operario que comete un error grave, una decisión de comprar materia prima de baja calidad bajo pretexto de reducir costos. El origen no es aleatorio y puede ser detectado y eliminado. Y siempre tenderán a aparecer nuevas Causas Especiales que otra vez deberán ser, e indefinidamente, detectadas y eliminadas. Lo importante es hacerlo oportuna y eficazmente.

El hecho de que una empresa productora de bienes o servicios no esté en capacidad de diferenciar en qué casos están actuando sobre sus procesos causas comunes o causas especiales puede conducir al cometimiento de graves errores en la toma de decisiones administrativas, y eso lo descubrió en 1924 el doctor Walter Shewart. Su respuesta fue inventar las Cartas de Control de Procesos. Esta técnica permite establecer si un proceso está bajo Control Estadístico o no, y de esa manera permite eliminar las causas especiales. Pero no sólo eso, si no que abre el camino para las acciones que permiten mejorar los procesos al disminuir las causas comunes. Y, además, sirven para monitorear si las mejoras ganadas se mantienen en el tiempo.

Existen varios tipos de Cartas de Control, para datos cuantitativos (Medias, Rangos, Desviaciones Estándar, de Datos Individuales, de Rangos Móviles, EWMA y Cusum). También

para atributos (p, np, c y u). En este trabajo se estudiarán las Cartas de Control básicas, dejando sentados los conceptos para que quien tenga interés o necesidad pueda profundizar en el estudio de las cartas que requiera. De todas formas, se indicarán las aplicaciones de las cartas que no se incluyen en este capítulo.

3.2.4.1. Cartas $\bar{X} - R$ (Medias y Rangos)

La forma típica de una Carta de Control puede verse en la Figura 58. La campana normal a la izquierda representa la amplitud de la variación del estadístico que se va a analizar en su desempeño temporal (en este caso, las variaciones de las medias y de los rangos de los datos extraídos de los subgrupos racionales). Además, siempre están presentes una Línea Central, un Límite Superior de Control y un Límite Inferior de Control.

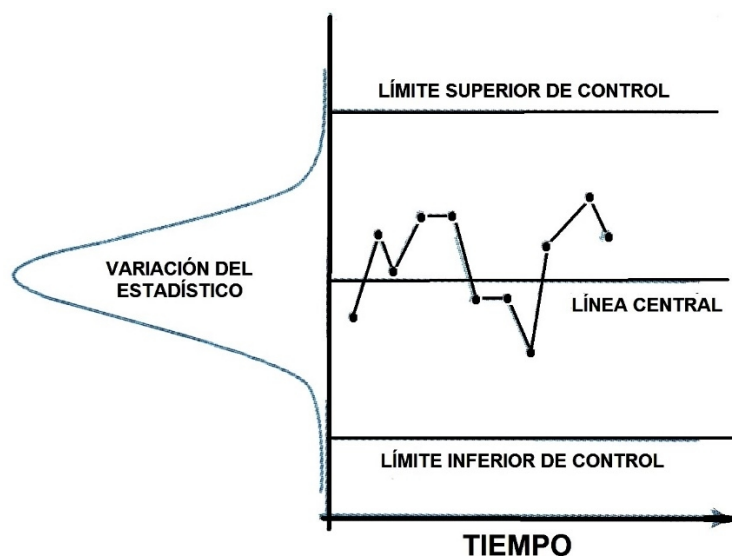


Figura 58: Diagrama de control típico

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Para todos los tipos de cartas, existen algunas reglas generales que deben cumplir los puntos dibujados alrededor de la Línea Central a fin de que se asuma un Control Estadístico para el proceso en cuestión, pero la más importante es que ningún punto debe salirse de los límites superior e inferior. Otra consideración relevante a tener presente es que los Límites Superior e Inferior de Control (LSC y LIC) no tienen ninguna relación con las especificaciones, normas,

tolerancias o deseos del cliente o de la gerencia respecto del proceso. LSC y LIC definen en realidad los límites naturales del proceso, tal como éste se desempeña actualmente. Si se desea aumentarlos o modificarlos de cualquier manera, habría que modificar su estructura y tecnología, es decir las 6M's que lo definen.

Finalmente, se debe mencionar que LSC y LIC deben calcularse de tal manera que los datos extraídos de la salida del proceso tengan una alta probabilidad de caer entre ellos, para poder estar seguros de que es lo que comúnmente ocurre en el proceso. Se estima que un 99,73% es suficiente, porque si fuera más alto el porcentaje, es posible que se dejen escapar datos que podrían indicar alteraciones del proceso originadas por causa especiales.

Si el proceso tiene una distribución normal y si se conocen la media poblacional del estadístico y la desviación estándar poblacional, o sea los parámetros poblacionales, lo adecuado sería calcular las tres líneas de la Carta de Control típica conforme a las ecuaciones siguientes:

Fórmula 27

Línea Central = μ del estadístico

LSC = μ del estadístico + 3 σ poblacional

LIC = μ del estadístico - 3 σ poblacional

Esta forma de cálculo sería la ideal (y real), pero debe considerarse que prácticamente nunca se conocen los parámetros poblacionales, por lo que deben hacerse inferencias a partir de los estadísticos factibles de obtener, y de acuerdo con los procedimientos estadísticos aceptados.

La Carta de Control $\bar{X} - R$ maneja datos cuantitativos y se aplica a operaciones productivas de tipo serie: varias decenas, cientos o miles de productos o servicios saliendo del proceso por hora o por día. De esa línea ininterrumpida de productos o servicios, cada cierto tiempo, se toma un lote de unas pocas unidades, y a ellas se les mide la característica de calidad

que interesa. Para los tipos de procesos lentos, no seriados, se utilizan las Carta de Control de Datos Individuales y de Rangos Móviles, que pueden consultarse en obras de estadística que tratan el tema. Como referencia, en este caso, se deben extraer lotes mientras sea necesario, hasta completar una muestra de 50 o 60 datos.

Es preciso tener presente que cuando se extraen lotes del proceso en acción no se puede hablar de su tamaño como si se tratara de muestras extraídas de piscinas de datos estáticos. Eso ya se comentó en el apartado 3.1.7.1., referido al muestreo de procesos. Deben usarse tablas especializadas y conceptos coherentes con la extracción de subgrupos racionales. En el caso de la Carta de Control $\bar{X} - R$, se considera que esta técnica tiene mayor potencia cuando se aumenta el tamaño n del subgrupo, pero que si $n > 10$ la Carta de Rangos ya no es suficiente para detectar cambios en la variabilidad del proceso. En general, para procesos seriados, se deben extraer lotes durante cuatro a diez días, hasta completar una muestra total de 120 a 150 datos. Más que fórmulas que indiquen el tamaño adecuado de los lotes que se extraen de la línea de producción, existen criterios que deben ser respetados.

A cada lote seleccionado se le calcula la Media y el Rango (la diferencia entre el dato de mayor valor y el dato de menor valor), como se puede ver en el ANEXO 17. Allí se presenta un ejemplo en que se obtienen 24 subgrupos racionales de 5 piezas, a fin de analizar la estabilidad del proceso. Las medias y los rangos de los subgrupos oscilan alrededor de las líneas medias de las cartas de control respectivas, y puede hacerse una analogía con lo que se ve en la Figura 59. En dicha Figura se establece que los datos de cada subgrupo siguen una distribución perfectamente normal, lo cual no debe interpretarse exactamente así.

Puede haber distribuciones sesgadas, o algo diferentes de la campana. Sólo si las formas fueran muy inusuales deberían investigarse las causas. En cualquier caso, el teorema del límite central puede subsanar muchos casos de no normalidad. Lo que sí debe tenerse presente son tres aspectos:

(a) que toda la teoría que se está revisando se fundamenta en la suposición de que los procesos que se estudian tienden a seguir distribuciones normales

(b) en la Figura 59 se plantea primero la situación ideal de estabilidad en las medias de los subgrupos, que siguen siempre una misma línea, por lo que son predecibles en el corto plazo; y al lado está la situación real del proceso, inestable debido a que las medias de las campanas son intrínsecamente impredecibles.

(c) en la segunda parte de la Figura 59 se ven las campanas siempre alineadas, pero sólo en el proceso idealmente estable los rangos o amplitudes son idénticos entre sí. En un proceso inestable los rangos varían en forma prácticamente libre.

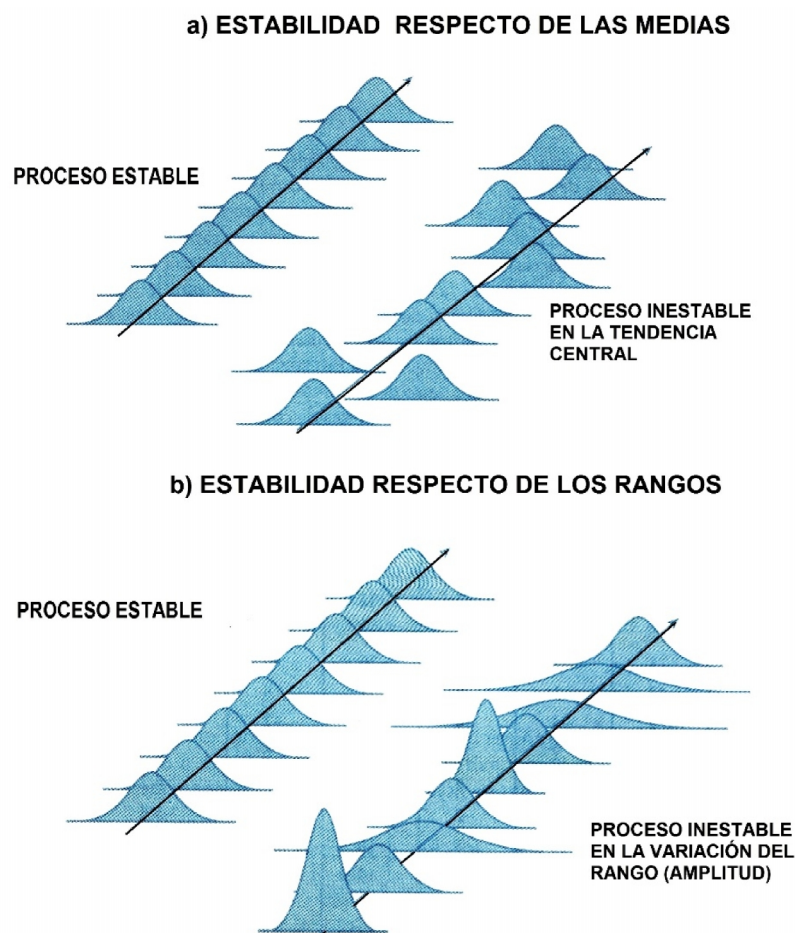


Figura 59: Estabilidad de medias y rangos

FUENTE: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

Por supuesto que la Figura 59 tiene sólo un sentido didáctico, evidenciando lo que tratan de evidenciar las Cartas de Control. No hay que construir algo así. Más adelante se enumeran reglas relativamente simples que permiten deducir de las cartas mismas si hay o no estabilidad estadística.

Los límites de la Carta de las Medias vienen dados por expresiones diferentes a las de la Fórmula 27, porque simplemente se está trabajando con muestras y no con la población entera. Cuando se trató de los Intervalos de Confianza, se vio que las medias de muestras extraídas de una población cualquiera presentan la llamada DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LAS MEDIAS, que bajo determinadas circunstancias pueden calcularse con alguna de las siguientes fórmulas ya descritas:

Fórmula 15

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Fórmula 16

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

Fórmula 17

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Fórmula 18

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

Lo mejor es trabajar con el parámetro σ , y la Estadística lo puede determinar con buena aproximación a partir del promedio de los rangos con la relación:

Fórmula 28

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Donde d_2 es una constante que depende de n , el tamaño del subgrupo racional. La tabla que entrega los valores de esta constante puede verse en el ANEXO 19. Además, se ha llegado a establecer la relación que se en la Fórmula 29, y los valores de la constante A_2 pueden consultarse en el mismo ANEXO XX.

Fórmula 29

$$3\sigma_{\bar{x}} = A_2 \bar{R}$$

De manera que las expresiones definitivas de los Límites de Control de la Carta de Medias, cuando se usan muestras a las que se les calculan las medias, son las siguientes:

Fórmula 30

$$\begin{aligned} LCS &= \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \\ \text{Línea central} &= \bar{\bar{X}} \\ LCI &= \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \end{aligned}$$

Son las fórmulas utilizadas en el ANEXO 17, y que dan por resultado los límites para las medias:

$$\text{Línea Central} = 6,0495$$

$$\text{LSC} = 6,09$$

$$\text{LIC} = 6,01$$

Si bien los límites de control permiten analizar la estabilidad del proceso sin problema, debe considerarse que ellos no son los límites reales o naturales del proceso. Estos límites están dados por las expresiones de la Fórmula 27, donde μ coincide bastante bien con $\bar{\bar{X}}$, y σ sale de la Fórmula 28. En el ejemplo analizado, d_2 es igual a 2,326, \bar{R} es igual a 0,0675, y σ resulta con un valor igual a 0,02902. De manera que los límites reales y naturales del proceso son:

Línea Central = 6,0495

LÍMITE SUPERIOR REAL = LSR = 6,13656

LÍMITE INFERIOR REAL = LIR = 5,96244

Es decir, los Límites Reales o Naturales del proceso son en realidad mayores que los Límites de Control. Esto es importante de señalar porque es usual confundir tres definiciones que son bien diferentes: ESPECIFICACIÓN, LÍMITE REAL y LÍMITE DE CONTROL. Es más, cuando se trate el concepto de CAPACIDAD, se verá que éste se relaciona con ESPECIFICACIÓN y con LÍMITE REAL, pero nunca con LÍMITE DE CONTROL. El Límite de Control se usa para analizar estabilidad y para detectar a tiempo cambios en el proceso que derivan de causas especiales, y nada más. Los Límite Reales indican que algunas mediciones individuales pueden alcanzar eventualmente esos valores, mayores de hecho que cuando se trata con promedios de mediciones.

Los límites de la Carta de los Rangos vienen dados por las expresiones contenidas en la Fórmula 31:

Fórmula 31

$$\text{Línea Central} = \bar{R}$$

$$\sigma_R = d_3 \sigma$$

$$LIC = \bar{R} - 3 \sigma_R = D_3 \bar{R}$$

$$LSC = \bar{R} + 3 \sigma_R = D_4 \bar{R}$$

\bar{R} es la media de los rangos de los subgrupos racionales. Se han introducido también las constantes d_3 , D_3 y D_4 que permiten simplificar los cálculos, como se ve en el ANEXO 17. Todas esas constantes se las puede consultar en el ANEXO 19. En el ejemplo analizado, los resultados de los límites para los rangos son:

Línea Central = 0,0675

LSC = 0,1428

LIC = 0,000

Evidentemente, el Límite Inferior de Control debe ser igual a cero. No pueden existir rangos negativos.

Para cerrar el tema de la Carta de Control $\bar{X} - R$, y refiriéndonos siempre al ejercicio del ANEXO 17, puede adelantarse respecto de las cartas allí presentadas que no existe algún punto fuera de los límites de control, lo cual indicaría sin lugar a dudas la existencia de una causa especial de variación; y que no existe tampoco algún tipo de comportamiento no aleatorio (tendencias ascendentes, descendentes o cíclicas) que también evidenciarían la presencia de causas especiales de variación. Más bien parecería que hay un comportamiento errático de los puntos graficados, lo cual indica la existencia de un proceso bajo control estadístico. De todas maneras, un análisis más detallado de la interpretación de las cartas de control se realiza más adelante.

3.2.4.2. Cartas $\bar{X} - S$ (Medias y Desviaciones Estándar)

En general, la potencia de una carta de control para detectar variaciones en un proceso se incrementa cuando se incrementa el tamaño n de los subgrupos racionales, pero cuando $n > 10$, la **Carta $\bar{X} - R$** ya no funciona bien porque la carta de rangos falla. Entonces se puede utilizar la **Carta $\bar{X} - S$** .

A cada subgrupo se le calcula la desviación Estándar S . Se puede calcular la media de esas desviaciones estándar, o sea \bar{S} . Entonces, se pueden definir las siguientes expresiones que permiten calcular los límites para la Carta de Control S :

Fórmula 32

$$\text{Línea central} = \bar{S}$$

$$\sigma = \frac{\bar{S}}{c_4}$$

$$\sigma_s = \sigma \sqrt{1 - c_4^2}$$

$$LSC = \bar{S} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2}$$

$$LIC = \bar{S} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{1 - c_4^2}$$

Los valores de la constante C_4 pueden consultarse en el ANEXO 19. Por otro lado, puesto que en esta carta de control se está definiendo σ de una manera distinta que en la **Carta $\bar{X} - R$** , también los límites de control de la **Carta \bar{X}** alteran sus fórmulas, de la siguiente manera:

Fórmula 33

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}}$$

$$\text{Línea central} = \bar{\bar{X}}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4 \sqrt{n}}$$

En el ANEXO 18 se puede ver un ejemplo que utiliza la **Carta $\bar{X} - S$** . En la carta de medias se puede apreciar que se presentó una causa especial en el subgrupo 6 que elevó la media por encima del límite superior de control, pero que luego desapareció. En cuanto a la carta de control de las desviaciones, no se ven puntos fuera de los límites, ni patrones no aleatorios.

CRITERIOS DE INTERPRETACIÓN DE LAS CARTAS DE CONTROL.-

Para cualquiera de las Cartas de Control que se estudian en este trabajo, y para cualquier otra en realidad, los criterios de interpretación son los mismos. El objetivo básico es detectar la presencia de causas especiales de variación. Las cartas de control sirven también como un instrumento que ayuda a reducir la variación de las causas comunes y para monitorear que las mejoras obtenidas se mantengan en el tiempo, pero el objetivo primordial es la detección de causas especiales de variación.

La presencia de puntos fuera de los límites de control o la ausencia de aleatoriedad en la disposición de los mismos son causa suficiente para presumir la existencia de una causa especial de variación. El asunto es definir la “ausencia de aleatoriedad”.

En general, la falta de aleatoriedad se traduce en las cartas de control como: Desplazamientos en el Nivel del Proceso, Tendencias en el nivel del proceso, Ciclos Recurrentes (Periodicidad), Mucha Variabilidad y Falta de Variabilidad (Estratificación). Ejemplos gráficos de estos casos se ven en la Figura 60. Debe notarse que para facilitar el análisis se suele dividir el espacio comprendido entre LSC y LIC en seis zonas.

Dependiendo del proceso, cada una de las posibles disposiciones gráficas contenidas en la Figura 60 proceden de situaciones reales que deben ser investigadas. Por ejemplo, el cambio de nivel puede ocurrir porque el proceso en sí mismo ha mejorado o ha empeorado, o porque se cambió de maquinaria. Las tendencias descendentes pueden indicar un desgaste del equipo o un sobrecalentamiento de las máquinas. Las tendencias descendentes en las cartas R y S indican disminución de la habilidad del operario o fatiga del mismo, o también cambio en la uniformidad de la materia prima.

Los comportamientos cíclicos pueden reflejar cambios periódicos en el ambiente, rotación regular de equipos u hombres, o la alternancia regular en el uso de máquinas.

Respecto de la mucha variabilidad o la falta de variabilidad de los puntos graficados, no se debe confundirlas con la variabilidad del proceso. Un PROCESO ESTABLE, bajo control

estadístico, con poca variabilidad, ocurre cuando todos los puntos que grafican los subgrupos caen dentro de esos límites, moviéndose en forma errática y con tendencia a estar cerca de la línea central. El nivel de variabilidad de los puntos de la Figura representa otras situaciones. Por ejemplo, la alta variabilidad puede provenir de un sobrecontrol innecesario del proceso, y la falta de variabilidad puede ser ocasionada por toma de subgrupos muy cercanos, por un “cuchareo de datos” o por el uso de cartas inapropiadas para el proceso.

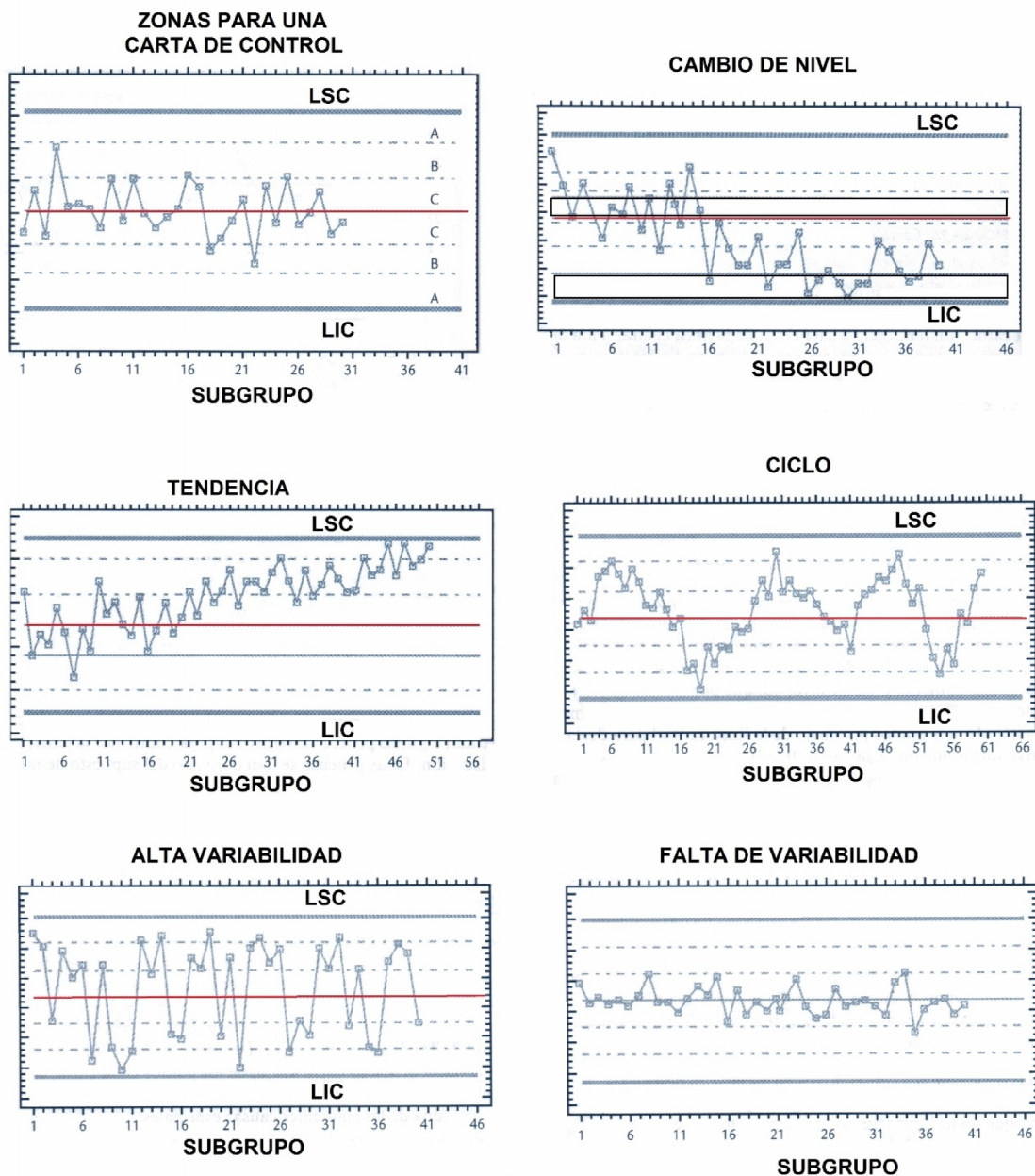


Figura 60: Causas de inestabilidad de un proceso

Fuente: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

La interpretación de las cartas depende mucho del proceso que se esté analizando y de la habilidad del experto que las maneje. Aquí sólo se pueden dar lineamientos generales. Por ejemplo, se recomienda analizar primero la carta R que la carta \bar{X} porque en general si la carta de rangos está fuera de control, casi de seguro que lo está también la segunda, pero son generalidades. Cada caso es cada caso.

Finalmente, debe indicarse que hasta aquí sólo se puede hablar de estabilidad y de control estadístico del proceso, pero no se puede hablar aún de la calidad del proceso en sí mismo. No se puede conocer todavía qué tan bueno o qué tan malo es que LSC y LIC estén donde están, pues eso sólo se puede definir cuando se relaciona la magnitud de la distancia entre esos límites con el concepto de CAPACIDAD. La capacidad ya considera las especificaciones entregadas por el cliente, la gerencia, la norma o el mercado. Eso se ve más adelante.

3.2.4.3. Cartas p (Proporción de Defectuosos)

Esta es una carta de control para atributos. Se aplica a situaciones de calidad tipo pasa-no pasa. Si un producto o servicio no pasa el criterio de calidad establecido, se le denomina producto o servicio defectuoso.

Esta fue la primera carta de control estadístico propuesta por Shewhart en un memorando del 16 de mayo de 1924, y su propósito fundamental es detectar la aparición de causas especiales que alteren la proporción de defectuosos que normalmente venían ocurriendo en un proceso.

En este caso también se extraen subgrupos racionales de tamaño n a partir de los lotes, pedidos, embarques o de la línea de producción, cada cierto período regular de tiempo. Se analiza la característica de calidad acordada en cada subgrupo racional y se determina la proporción de defectuosos para el subgrupo. En la Fórmula 34 la proporción de defectuosos del subgrupo se conoce como p_i , y es el valor que se grafica en la Carta de Control p .

Para establecer los límites centrales, se debe recordar que es la Distribución Binomial la apropiada para describir las frecuencias en fenómenos estadísticos que cumplen la condición pasa-no pasa, si-no, pero que debido a la dificultad de aplicar las fórmulas de esa distribución, se prefiere su aproximación a la distribución normal, que es razonablemente exacta, dando por resultado las expresiones que se ven en la Fórmula 34.

Fórmula 34

$$p_i = \frac{d_i}{n_i}$$

$$\text{Línea central} = \bar{p}$$

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}}$$

$$LSC = \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}}$$

$$LIC = \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}}$$

La Línea Central está dada por el promedio de las proporciones p_i . n es el tamaño de los subgrupos racionales, que debe ser preferentemente el mismo para todos ellos. Las reglas para detectar la presencia de causas especiales son las mismas que las establecidas para todas las cartas de control.

3.2.4.4. Cartas C y U (Número de Defectos y Número de Defectos por Unidad)

Con igual enfoque que la distribución de Poisson, que se interesa en la distribución de defectos por unidad (artículo, lote, longitud, área, volumen o tiempo), estas cartas requieren del conteo de defectos, en vez de sólo basarse en el criterio defectuoso-no defectuoso. Puede también pensarse en cualquier otro evento que se pretenda seguir, no sólo la condición de

defecto. En ese caso, se debe hacer un conteo de los eventos que interesan (número de accidentes, número de errores, número de quejas, número de clientes, número de autos etc.) y relacionarlos sea con el número de subgrupos estudiados, o relacionarlos con una unidad respecto de la cual ellos pueden ocurrir (número de accidentes por semana, número de errores por máquina, número de quejas por agencia, número de clientes por ventanilla, número de autos por día, etc.)

Carta C.- Esta carta detecta la variabilidad del número de defectos (o eventos) que ocurren en los subgrupos estudiados. La condición es que el tamaño de los subgrupos sea el mismo. Se grafica la cantidad C_i , que es el número de defectos que ocurre en cada subgrupo (pueden ser los defectos en un solo artículo, en lotes de tamaño igual, en iguales intervalos de tiempo, etc.).

Fórmula 35

$$\bar{c} = \frac{\text{Total de defectos}}{\text{Total de subgrupos}}$$

$$\text{Línea central} = \bar{c}$$

$$\sigma_c = \sqrt{\bar{c}}$$

$$LSC = \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}}$$

$$LIC = \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}}$$

Carta U.- Tiene un enfoque parecido al de la carta de control C, pero se utiliza cuando el tamaño de los subgrupos no es constante. En este caso, se grafica el estadístico U_i , que es el número de defectos del subgrupo i relacionado con el tamaño n_i . Para graficar los límites de la carta U se utilizan las expresiones de la Fórmula 36.

Fórmula 36

$$u_i = \frac{c_i}{n_i}$$

$$\bar{u} = \frac{\text{Total de defectos}}{\text{Total artículos inspeccionados}}$$

$$\text{Línea central} = \bar{u}$$

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$$

$$LSC = \bar{u} + 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$$

$$LIC = \bar{u} - 3\sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}$$

Índice de Inestabilidad, S_t , es aplicable a todas las cartas de control estudiadas, y trata de calificar la inestabilidad con la fórmula $S_t = (\text{Número de Puntos Especiales} / \text{Número Total de Puntos}) * 100$. Los puntos especiales son todos aquellos que de alguna manera transgreden la aleatoriedad: están fuera de los límites de control, tienen tendencias, etc.

3.2.5. CAPACIDAD DE LOS PROCESOS

Las Cartas de Control básicamente nos dicen si el proceso está bajo control estadístico, en el sentido de que no existen causas especiales que estén originando variabilidad en el proceso. Variabilidad que disminuye la calidad, aumenta los costos y hace impredecibles los datos de salida del proceso. Pueden ayudar en otros aspectos bien concretos y valiosos, pero lo que no dicen es si el proceso es de calidad aceptable para el medio. O si es de calidad mundial, si es que hablamos de procesos Seis Sigma. Los Límites Naturales o Reales del proceso están dados por las expresiones:

$$\text{Línea Central} = \mu$$

$$LSC = \mu + 3 \sigma$$

$$LIC = \mu - 3 \sigma$$

Son expresiones basadas en el criterio de que los procesos tienden a distribuir la frecuencia de sus salidas siguiendo una distribución normal. Es ciertamente arbitrario tomar 3

desviaciones estándar hacia arriba y tres desviaciones estándar hacia debajo de la línea media (marcada por la media de los promedios de los subgrupos racionales), pero esta convención asegura que el 99.73% de los datos que usualmente ocurren (o sea prácticamente todos) estén entre esos límites, a menos que alguna causa especial altere esa rutina de ocurrencia.

Los límites naturales expresan el desempeño natural del proceso, definido por las 6 M's que son las entradas del mismo. Si se quieren límites naturales que estén más cercanos entre sí, o sea que las salidas estén más cerca consistentemente de la línea media, habrá que comprar tecnología más moderna, capacitar gente o establecer metodologías más avanzadas, o sea generar básicamente un nuevo proceso, con nuevos límites naturales.

Para saber si un proceso establecido tiene un buen desempeño (se dice "si es capaz"), debe comparársele contra algo. Entonces, se debe definir respecto de qué patrón el proceso es capaz o es incapaz. Y esa medida de comparación son las ESPECIFICACIONES, TOLERANCIAS o NORMAS establecidas por el cliente, la gerencia, el mercado o el medio. La forma de definir una especificación es por medio de un rango, alrededor de una media. Por ejemplo, en el problema del ANEXO 17, se puede definir que el cliente necesita las piezas con medidas $6,05 \pm 0,1$ pulgadas. En este caso, la ESPECIFICACIÓN SUPERIOR ES = 6,15 pulgadas y la ESPECIFICACIÓN INFERIOR EI = 5,95 pulgadas.

Lo siguiente es comparar los límites de la especificación con los límites naturales del proceso. No se deben comparar los límites de especificación contra los límites de control, que sabemos son más estrechos que los límites reales o naturales. En la Figura 61 se puede ver la comparación de los límites especificados con los límites naturales del proceso del problema.

En esa Figura se ve que los límites especificados por el cliente son mayores que los límites naturales del proceso (fijarse en la holgura en naranja), lo que significa que la mayoría de los datos de salida del proceso caerán dentro de lo deseado por el cliente, él estará satisfecho y el proceso ha sido "capaz" de cumplirle sus especificaciones.

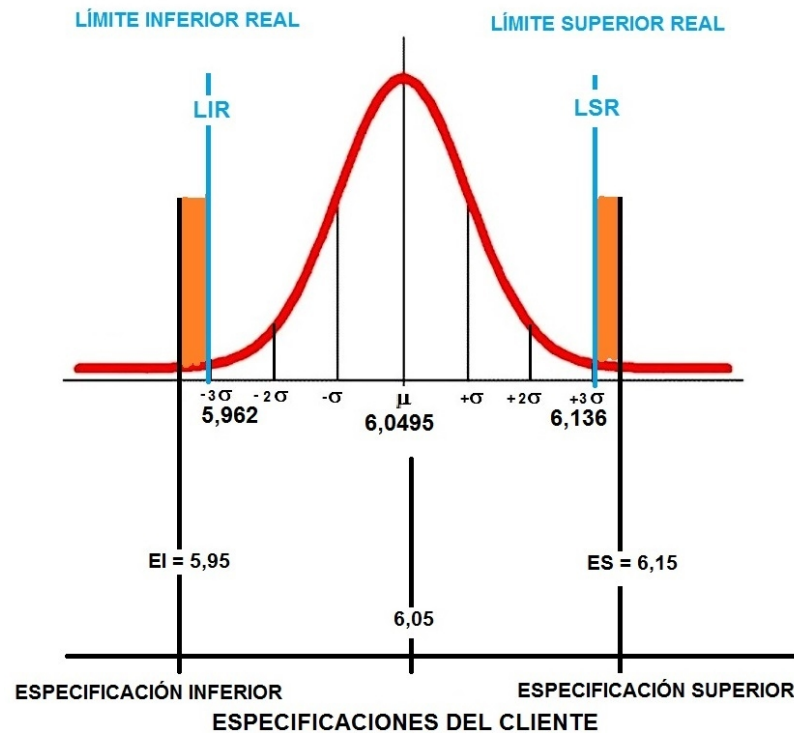


Figura 61: Límites naturales del proceso (poca holgura)

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El índice de capacidad potencial del proceso, C_p , se expresa con la siguiente fórmula:

Fórmula 37

$$C_p = \frac{ES - EI}{6\sigma}$$

σ es la desviación estándar poblacional, y cuando se trabaja con las cartas de control, se la puede calcular a partir de la Fórmula 28, que hace la estimación basándose en el manejo de subgrupos (por eso se dice que es la desviación estándar intra grupos). Con esta desviación estándar se calculan los índices C. Cuando se cuenta con el parámetro poblacional verdadero, no estimado, se pueden calcular los índices P. Es claro que un proceso es potencialmente capaz si es que $C_p > 1$. Se le llama potencialmente capaz porque en realidad hay un factor adicional a considerar: si es que el proceso está centrado respecto de la línea media de la especificación. Eso lo vemos más adelante. Asumiendo que hay una relativa alineación entre μ del proceso y la línea media de la especificación, se puede comprender que un proceso será más capaz si es que

la curva normal del proceso es más estrecha y tiene más holgura respecto de las especificaciones (área naranja), como se ve en la Figura 62.

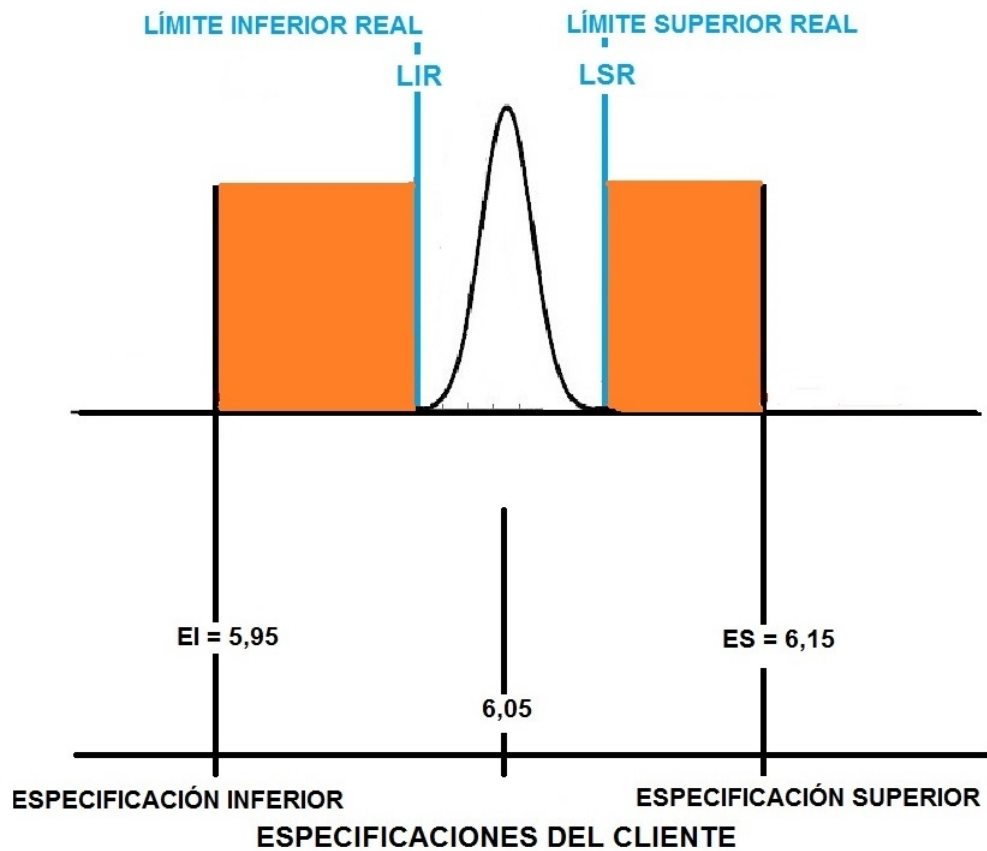


Figura 62: Límites naturales del proceso (bastante holgura)

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En el caso del ejemplo del ANEXO 17, la capacidad potencial C_p puede calcularse también con la fórmula 38:

Fórmula 38

$$C_p = \frac{ES - EI}{LSR - LIR}$$

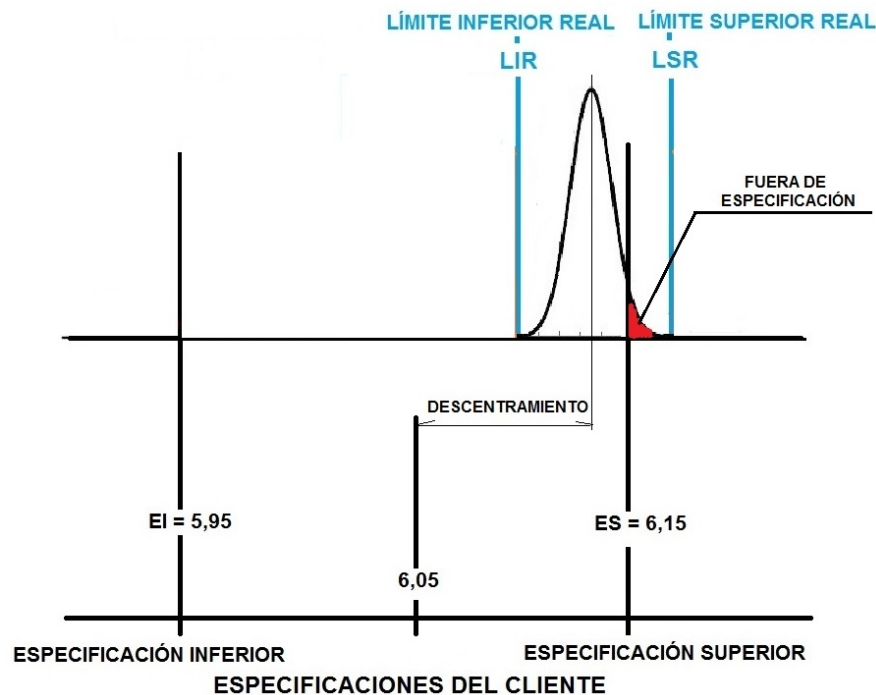
De donde, en el ejemplo, $C_p = 1,15$. Como $C_p > 1$, se trata de un proceso capaz respecto de la especificación. Otro asunto es la calificación de los índices de capacidad potencial C_p :

Tabla 26**Niveles de C_p y clase del proceso centrado**

Valor de C_p	CLASE DEL PROCESO	OBSERVACIONES
$C_p \geq 2$	Clase Mundial	Calidad Seis Sigma
$C_p > 1,33$	1	Buena Calidad
$1 < C_p < 1,33$	2	Calidad que requiere control riguroso
$0,67 < C_p < 1$	3	Calidad insatisfactoria. No se cumple con especificaciones Se requiere trabajar sobre el proceso para que llegue a ser adecuado para el trabajo. Inspección al 100%.
$C_p < 0,67$	4	Totalmente no adecuado para cumplir especificaciones. Modificarlo totalmente.

FUENTE: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

Los Índices C_{pi} y C_{ps} toman en cuenta el descentramiento del proceso respecto de la especificación. Puede ser que un proceso siga una distribución normal esbelta, y que sus 6 σ estén por dentro del espacio comprendido entre ES y EI, pero el descentramiento puede convertirlo en un proceso incapaz, como se ve en la Figura 63.

**Figura 63: Proceso descentrado**

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Los Índices **C_{pi}** y **C_{ps}** significan Índice de Capacidad para la Especificación Inferior e Índice de Capacidad para la Especificación Superior, respectivamente, y se calculan con las expresiones:

Fórmula 39

$$C_{pi} = \frac{\mu - EI}{3\sigma}$$

$$C_{ps} = \frac{ES - \mu}{3\sigma}$$

En el caso del ejemplo del ANEXO 17, los índices calculados son: **C_{pi}**=1,14 y **C_{ps}**=1,15.

Para la interpretación se usa también la Tabla 26, aunque hay un ajuste en el nivel 1, en que se considera adecuado el proceso si es que C_{pi} o C_{ps} son mayores que 1,25 (y no mayores que 1,33).

Para los valores numéricos obtenidos, estamos frente a un proceso que requiere un control riguroso. Si alguno de esos dos índices fuese menor que 1, por ese lado no se cumpliría la especificación y el proceso debería ser fuertemente controlado, o desechado del todo.

El índice **C_{pk}** se conoce como Índice de Capacidad Real del Proceso, y es una versión mejorada de C_p, en la que se toma en cuenta el descentramiento. Su valor es igual al menor valor que se obtiene al comparar los Índices C_{pi} y C_{ps}. Es decir:

Fórmula 40

$$C_{pk} = \text{Mínimo} \left[\frac{\mu - EI}{3\sigma}, \frac{ES - \mu}{3\sigma} \right]$$

En el caso del ejemplo del ANEXO 17, C_{pk} vale 1,14 que es valor menor de los dos índices unilaterales. C_{pk} ≤ C_p siempre, si hay descentramiento. Si se corrige este defecto de

descentramiento, se puede alcanzar la capacidad máxima indicada por C_p . Para que un proceso existente tenga un desempeño satisfactorio, se requiere que $C_{pk} > 1,25$. Para procesos nuevos se requiere que $C_{pk} > 1,45$. Es posible que C_{pk} tenga valores nulos o negativos.

En el ANEXO 20 se pueden ver el porcentaje de artículos fuera de especificación, así como los defectos por millón de oportunidades DPMO, que ocurrirían para diferentes niveles de los índices C, que se conocen también como de corto plazo.

Los índices P_p y P_{pk} son completamente equivalentes a los índices C_p y C_{pk} , sólo que utilizan σ como parámetro poblacional en lugar de una estimación salida de las cartas de control. Por eso está σ_L (desviación estándar de largo plazo) en la Fórmula 41. El problema es hallar dicho parámetro. Pueden utilizarse muestras extraídas a muy largo plazo, lo que significa un extenso seguimiento del proceso. Se considera que estos índices describen el comportamiento del proceso a largo plazo, y se calculan con las siguientes expresiones:

Fórmula 41

$$P_p = \frac{ES - EI}{6\sigma_L}$$

$$P_{pk} = \text{mínimo} \left[\frac{\mu - EI}{3\sigma_L}, \frac{ES - \mu}{3\sigma_L} \right]$$

Donde σ_L considera todos los datos obtenidos y se calcula con la fórmula tradicional de la desviación estándar. En el ejemplo del ANEXO 17, suponiendo que sean datos suficientes para calcular un parámetro poblacional (que no lo son en realidad), la desviación estándar de todos los elementos de todos los subgrupos (por eso se dice que considera la variación entre muestras y dentro de las muestras) es $\sigma_L = 0,0319$ que varía bastante –como en un 10%- respecto del valor

calculado con la Fórmula 28 ($\sigma=0,02902$). Esta última estimación de la desviación estándar se dice que es de corto plazo y que sólo considera la variación dentro de los subgrupos, por lo que da una perspectiva de corto plazo respecto de la capacidad del proceso.

El índice Z es otra forma de medir la capacidad, desde la perspectiva de Seis Sigma. Por supuesto, también considera las Especificaciones Inferior y Superior entregadas por el cliente y las relaciona con la Desviación Estándar del proceso, tanto con la de corto plazo (intragrupos) como con la de largo plazo (intra e intergrupos). Las expresiones para calcular este índice son:

Fórmula 42

$$Z_s = \frac{ES - \mu}{\sigma} \quad \text{y} \quad Z_i = \frac{\mu - EI}{\sigma}$$

$$Z = \text{mínimo} [Z_s, Z_i]$$

$$Z_m = Z_c - Z_L$$

Para la doble especificación se tiene Z_s y Z_i , y las dos pueden calcularse con σ a corto o largo plazo. Z del proceso es la menor de las dos, en cada uno de los casos (Z_c a corto plazo y Z_L a largo plazo). Z_m es la diferencia entre los índices Z_c a corto y Z_L largo plazo, y se conoce como el desplazamiento del proceso. Representa la habilidad para controlar la tecnología. Si $Z_m < 1,5$ se considera que existe un mal control de la tecnología. Si no conoce Z_m , se lo asume como igual a 1,5. En base a estas fórmulas se puede construir la tabla que se ve en el ANEXO 21.

Otras relaciones útiles son: $Z_c = 3 \cdot C_{pk}$ y $Z_L = 3 \cdot P_{pk}$.

En el caso del ejercicio del ANEXO 17, los valores de los índices Z estudiados se resumen así:

Tabla 27**Índices Z para el ejemplo del ANEXO 17**

	σ	Z_i	Z_s	Z	Z_m
CORTO PLAZO	0,02902	3,4287	3,4631	$Z_C = 3,4287$	$Z_m = 0,3096$
LARGO PLAZO	0,0319	3,1191	3,1505	$Z_L = 3,1191$	

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En el apartado 3.1.5., referido a los Niveles Seis Sigma, se trató sobre el concepto “deriva del proceso”, que es la razón por la que se debe disminuir $1,5\sigma$ al nivel en que una empresa o proceso se calcula que opera. Se vio también la manera de encontrar el Nivel Seis Sigma de Operación de un proceso en base al número de defectos observados. Los índices Z calculan el nivel Seis Sigma del proceso de una manera más organizada. De ser posible, es mejor calcular el índice Z con σ a largo plazo (no hay que olvidar que σ a largo plazo del ANEXO 17 se calculó asumiendo que hay datos suficientes, lo cual no es cierto). Entonces se tendría Z_L , que es el índice a calificar en la tabla del ANEXO 7. En el caso de ese ejemplo, la calificación del proceso es $Z_L = 3,1191$ que equivale a un nivel de competitividad bajo. Si es que no se conociera Z_L , se debería trabajar con Z_C , pero como se sabe que el proceso deriva a largo plazo, se debería disminuir $1,5\sigma$ a la calificación del proceso. Como se vio en el apartado 3.1.5., cuando se calculan los DPMO debe considerarse que el proceso deriva a uno u otro lado, y no a los dos simultáneamente, por lo que el DPMO se debe dividir para dos.

3.3. SEIS SIGMA Y EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

3.3.1. GENERALIDADES DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El Diseño de experimentos es la principal herramienta de la metodología Seis Sigma en las fases “Analizar” y “Mejorar” (Improve) del protocolo DMAIC. Una vez que en la fase “Medir” se ha establecido la LINEA BASE, que define la situación actual del proceso en cuanto a inestabilidad, variabilidad, centramiento, capacidad e índice Z se puede pasar a la fase “Analizar”. En esta fase se definen las “X potenciales” o “entradas potenciales” que pueden estar causando problemas en el proceso, por medio de técnicas como Pareto e Ishikawa. Cuando, en esta misma fase, se deben definir los “poco vitales”, o sea aquellos factores que realmente inciden en el desempeño del proceso, la técnica por excelencia es el Diseño de Experimentos, básicamente en su modalidad Diseño Factorial 2^k . Los estudios de correlación un factor-salida cada vez suelen ser insuficientes porque normalmente sobre la salida actúan varios factores en forma simultánea, y por otro lado los intentos tipo prueba-error para tratar de determinar una combinación óptima de factores no conducen a nada, en la mayoría de los casos.

En el Diseño Factorial 2^k se analizan los posibles factores de incidencia, actuando en dos niveles cada uno, y a través del análisis de varianza (ANOVA) se pueden determinar los factores realmente significativos en la salida del proceso. Es posible, incluso, hallar una fórmula que relacione la salida con los factores determinados como significativos, de manera de poder manejar combinaciones que optimicen los resultados. Esta acción está ya en la fase “Mejorar”. En diseños factoriales no se utiliza la prueba LSD.

En la fase de “Control” se diseña un sistema que mantenga las mejoras alcanzadas, se documenta el trabajo realizado, y se realiza un seguimiento por medio de las cartas de control.

Si se comprueba que el proceso se mantiene en los niveles deseados y que el sistema funciona adecuadamente, se puede dar por terminado el proyecto.

El Diseño de Experimentos ofrece diferentes modalidades, para un factor, un factor con bloques, diseños factoriales, etc. Sin embargo, en lo que a la metodología Seis Sigma se refiere, la experiencia ha demostrado que en la práctica totalidad de proyectos el método adecuado es el factorial 2^k . Por tanto, en este trabajo se revisará exclusivamente este diseño aplicado a la mejora de procesos.

3.3.2.- EL DISEÑO FACTORIAL 2^k Y SUS REGLAS

Debido a su versatilidad, tiene un alto impacto en la industria, en particular cuando se trata de mejorar procesos por medio de la metodología Seis Sigma. Los diseños factoriales 2^k estudian el efecto de k factores considerando dos niveles de prueba en cada uno (Ver Figura

64).

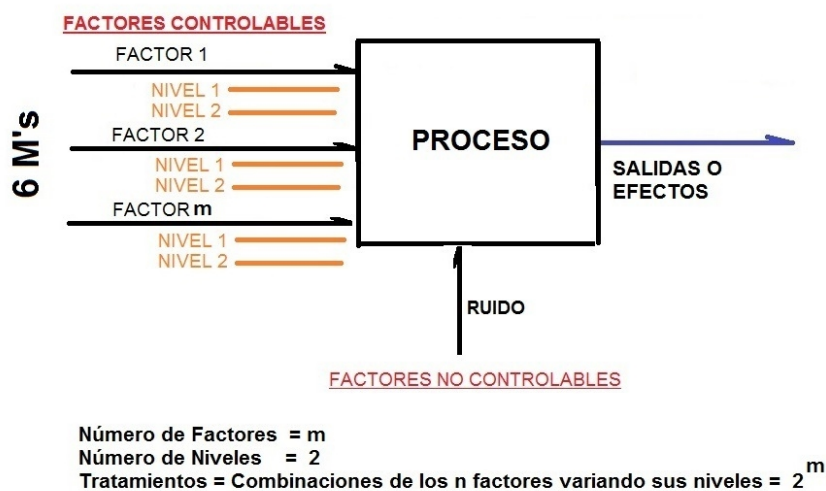


Figura 64: Diseño Factorial 2^k

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En la Figura 64 puede verse que un proceso puede tener m FACTORES CONTROLABLES, que son o no significativos respecto de la salida. Justamente el diseño factorial 2^k trata de

determinar cuáles factores son significativos y cuáles no. Son controlables porque se corresponden con las 6 M's que normalmente determinan la operación de un proceso. Como deben probarse los efectos de todos los t tratamientos posibles (combinaciones de cada vez los k factores variando en los dos niveles establecidos), el número mínimo de pruebas (experimentos o corridas) a realizarse es precisamente $t=2^k$. Pero, adicionalmente, pueden estar incidiendo en el proceso FACTORES NO CONTROLABLES, de ruido, que muchas veces no son siquiera identificables, como por ejemplo las variables ambientales. Estos factores no controlables deben ser eliminados en el análisis por medio de "replicar" o repetir los tratamientos. De esa manera, el NUMERO TOTAL DE EXPERIMENTOS (N) es igual al número de réplicas (n) multiplicado por el número de tratamientos (t). $N=n*2^k$.

Se recomienda utilizar los factoriales 2^k completos cuando el número de factores potencialmente significativos están entre 2 y 4, porque en esos casos, considerando las réplicas, se correrían entre 12 y 32 experimentos, que son manejables en el ámbito empresarial. Si el número de factores es mayor que 4, se recomienda utilizar un factorial fraccionado. En la práctica, es mejor hacer varios experimentos pequeños con pocos factores que uno solo grande con muchos factores, porque es muy improbable que más de cuatro factores interactúen todos entre sí. Lo aconsejable es organizar experimentos 2^k de tres o máximo cuatro factores.

Incluso en casos de industrias con procesos relativamente complicados los factores no van más allá de cuatro. Por ejemplo, en el caso de Chaide y Chaide, cuando en un estudio se trató de mejorar el proceso de elaboración de espuma de poliuretano usando Seis Sigma⁷⁷, se

⁷⁷ León, M.E., & Salazar, D.M. (2013). *Mejoramiento del proceso de fabricación de espuma de poliuretano en la empresa Chaide y Chaide S.A. utilizando la metodología Lean Six Sigma*. Tesis de maestría no publicada, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

halló que la variable de salida (altura de los laminados) depende en realidad sólo de tres factores significativos: la temperatura del molde, la cantidad de agua y la cantidad de octoato de estaño, a pesar de existir más de diez factores controlables de diseño.

En el caso de AYMESA⁷⁸, se encontró que el espesor de la capa de la pintura aplicada a la carrocería de los vehículos, en el proceso de pintado con soplete, dependía de tres factores críticos: flujo de aire, temperatura de la cabina y humedad relativa del ambiente. Por más que había varios otros factores que se sabe afectan al proceso.

En el caso de una empresa envasadora de café (se omite el nombre) en Guayaquil⁷⁹, se halló que la eficiencia del envasado depende del peso específico del café y del nivel de vacío de la máquina envasadora.

En casos publicados de diseño experimental aplicado a la industria automotriz, como es el caso de General Motors, tratándose de incluso de procesos sofisticados de fabricación de partes críticas para los sistemas de conducción, es usual la presencia de diseños del tipo 2^3 .

Debe señalarse finalmente que el uso de “Puntos Centrales”, que sirven para detectar la presencia de relaciones no lineales, puede también servir para disminuir el número de réplicas.

Cuando se trata del factorial 2^2 se recomienda realizar mínimo de tres réplicas. Para $k=3$ se recomiendan tres réplicas y para $k=4$ se recomienda una réplica. Con más de 4 factores se

⁷⁸ Lalaleo, B.R. (2012). *Propuesta de mejoramiento del proceso de pintura mediante la metodología Six Sigma, caso: AYMESA*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

⁷⁹ Buestán, M. (2013). *Aplicación de la metodología Seis Sigma para reducir la pérdida de café al granel en una planta de envasado*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

suele hacer una sola repetición y fraccionar. Como regla general, no deberían excederse los 32 experimentos en total.

REGLAS DEL DISEÑO FACTORIAL 2^K

1 REGLA.- Los experimentos deben realizarse en orden aleatorio. Existen procedimientos que ayudan a definir organizadamente todas las combinaciones o tratamientos posibles de los factores y niveles (Ver ANEXO 22), pero éstos y las réplicas correspondientes deben aleatorizarse antes de su ejecución.

2 REGLA.- Es necesario diferenciar entre efectos reales y ruido. La manera de hacerlo es replicando los tratamientos. La regla general es no exceder los 32 experimentos en total. Por eso, para $k > 5$ se recomienda una sola repetición y fraccionar. Fraccionar quiere decir ejecutar sólo una parte de los tratamientos posibles. Debe sacrificarse información no tan relevante por medio de realizar una jerarquización de los efectos. La aplicación del Diseño de Experimentos a la mejora de procesos usualmente no requiere del uso de fraccionados cuando se trata hasta con cuatro factores.

3 REGLA.- Los experimentos deben realizarse en igualdad de circunstancias respecto de los factores controlables no incluidos en ellos. Es lo que se llama Principio de Bloqueo. Por ejemplo, si se estudia la calidad en un proceso de pintura, en el que la salida está determinada por la temperatura, el tiempo de horneado y el tipo de preparación de la superficie a pintar, todos los experimentos deben realizarse con la misma marca de pintura, con el mismo pintor y con el mismo equipo. Estos últimos tres también son factores controlables, pero como no participan en el experimento, deben “bloquearse”.

4 REGLA.- El experimento debe poder detectar interacciones entre los factores, si es que éstas existen. Para ello se utilizan los **Gráficos de Interacción**. Una vez que se corren los

experimentos y se tienen los datos de salida, es posible graficar los efectos de los dos puntos de prueba de un factor, visualizando si dichos efectos sobre la salida del proceso se alteran cuando el otro factor cambia de nivel (Ver Figura 65).

En la Figura A) de la Figura 65 pueden verse a los factores A y B actuando independientemente sobre la salida, es decir para cada factor se ha medido el efecto en ausencia del otro factor. Cuando existe interacción, que es lo que se ve en las Figuras B) y C), el efecto sobre la salida del factor que está en el eje X sufre una fuerte alteración en cuanto el otro factor cambia de nivel (podría tratarse incluso de que primero no está y después si está), al punto de que las pendientes de las rectas cambian significativamente, incluso pueden llegar a cambiar su signo. Cuando no existe interacción, que es lo que se ve en las Figuras D) y E), las pendientes de las rectas que indican el cambio de efecto del factor que está en el eje X varían ligeramente, o no varían en absoluto (paralelas), si el otro factor cambia de nivel.

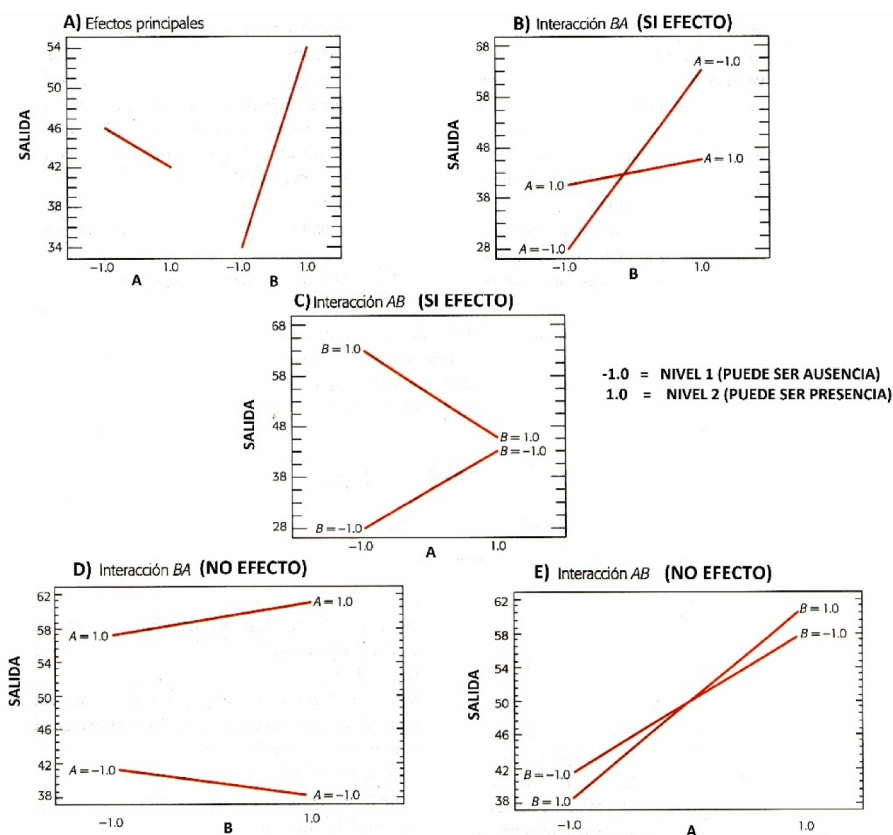


Figura 65: Interacciones

Fuente: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2008). Análisis y diseño de experimentos. México, D.F.; McGraw-Hill/Interamericana.

Las interacciones deben ser tomadas muy en cuenta, pues permiten entender bien el proceso. Por ejemplo, en el caso de los factores que sí tienen interacción en la Figura 65, se puede ver que la mínima salida posible se obtiene con los factores A y B actuando en sus respectivos niveles -1, simultáneamente. Pero, además de eso, cuando se determina que la interacción de dos factores (interacción doble) es estadísticamente significativa, su efecto sobre la salida suele ser más importante que la de los efectos principales, y por eso su interpretación tiene prioridad.

En el caso del experimento realizado en una pequeña empresa de la ciudad de Quito, que se presenta en el Capítulo 4, y que analiza la salida “NIVEL DE ADHERENCIA” de un proceso (aplicación de pintura líquida de secamiento al ambiente) cuando se varían los factores de preparación de la superficie: (A) Imprimante y (B) antioxidante, se puede ver la absoluta falta de interacción de esos dos factores, cuando varían entre sus dos niveles de prueba: se usa (+1) y no se usa (-1).

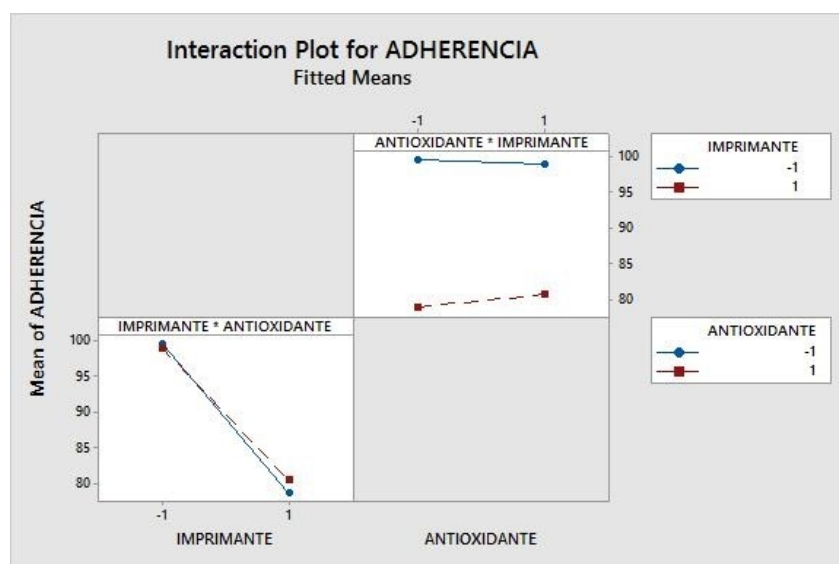


Figura 66: Interacción Imprimante - Antioxidante

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En cuanto a los efectos principales, se puede ver que el Imprimante actúa negativamente sobre el nivel de adherencia, por lo que seguramente debe ser suprimido del proceso. El antioxidante no tiene efecto significativo, como se desprende del ANOVA de ese proyecto.

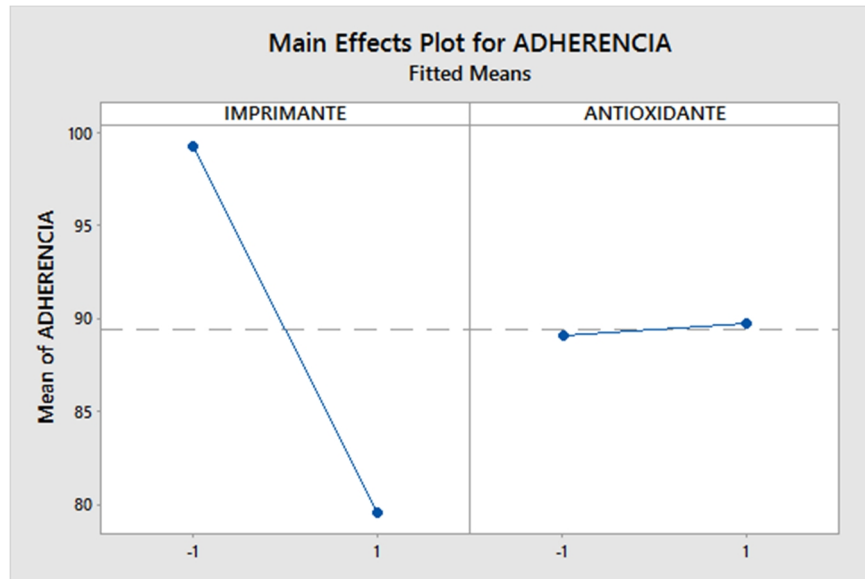


Figura 67: Interacciones principales Imprimante - Antioxidante

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

A veces, como en este caso en el que los efectos principales de los factores sobre la salida del proceso son tan evidentes, los gráficos de interacción pueden ser suficientes para extraer conclusiones. Pero no siempre es así, y se debe continuar con el análisis de varianza ANOVA.

5 REGLA.- Los Diseño 2^k se estudian por medio del Análisis de Varianza ANOVA, la principal técnica del Diseño de Experimentos, que en este caso se basa en la comparación de la variación debida a los FACTORES (y sus combinaciones) con la variación debida al ERROR que ocurre dentro de los tratamientos por pequeñas distorsiones en los procesos de muestreo y medición, o por causas no asignables. Cuando el primer tipo de variación predomina claramente sobre el segundo, se puede concluir razonablemente que los tratamientos que combinan los factores son significativos, es decir tienen efecto sobre la salida.

La variación tiene que ver con la varianza, por lo que el estadístico usado para comparar variaciones es el estadístico F_0 , que relaciona cada vez la variación debida a un factor o a una combinación de factores con la variación debida al error. F_0 es el cociente del Cuadrado Medio del factor sobre el Cuadrado Medio del error ($F_0 = CMA / CME$, si se analiza el factor A). Con F_0 , y los grados de libertad del numerador y del denominador, se puede calcular el P-value, que debe ser menor que 0,05 (o menor que el nivel de confianza establecido) para indicar significación. Se puede obtener también el P-value del modelo matemático encontrado por el ANOVA para predecir las salidas del proceso.

El estadístico F_0 sigue una distribución F, cuando la Hipótesis Nula es cierta. Si se tratara de un diseño experimental 2^2 , las hipótesis nulas y las respectivas hipótesis alternativas a plantear serían:

H_0 : Efecto A = 0	H_0 : Efecto B = 0	H_0 : Efecto AB = 0
H_A : Efecto A \neq 0	H_A : Efecto B \neq 0	H_A : Efecto AB \neq 0

Para los cálculos que requiere el Análisis de Varianza existe un proceso manual estadístico bien definido, pero en este trabajo se usarán exclusivamente herramientas informáticas que ejecutan automáticamente el ANOVA, en base a los datos experimentales proporcionados al programa. De esa manera, se podrá hacer más bien énfasis en la interpretación de los resultados.

El ANOVA puede generar una ecuación que predice la salida del proceso y que tiene los valores de los factores actuando en sus términos. Calcula también coeficientes de determinación que califican la calidad de predicción de esa ecuación. En base a la ecuación, el ANOVA proporciona información respecto del cumplimiento de los supuestos que hacen posible el uso de esta técnica, como se ve más adelante.

Al realizar la revisión del ANOVA, es importante considerar que el error debe tener al menos ocho grados de libertad, si no es así el ANOVA pierde validez. Para resolverlo, se debe realizar más réplicas, o incluir “Puntos Centrales” entre los tratamientos que van a ser probados.

6 REGLA.- PUNTOS CENTRALES.- Los puntos centrales, o “puntos al centro”, son propios del Diseño Factorial 2^K . Si se trata variables cuantitativas, para cada factor, el punto central se halla entre el nivel inferior y el nivel superior respectivos. No se puede hablar de puntos centrales si se está trabajando exclusivamente con variables categóricas (como por ejemplo variables que sólo tiene los niveles SI/NO o -1/+1).

En el Capítulo 4, en el caso de diseño experimental de pintura electrostática de secamiento al horno, se puede ver el desarrollo de una tabla de corridas con puntos centrales. La nomenclatura es $0 - 0 - +1$ y $0 - 0 - -1$. Los ceros equivalen a 265°C , pintado después de 2 horas de preparación de la superficie, +1 es Pintura Horneable Líquida y -1 es Pintura Horneable en Polvo.

En cualquier diseño experimental, bastaría que uno solo de los factores sea una variable cuantitativa para que se puedan armar las combinaciones requeridas de los puntos centrale. Por ejemplo, si se tienen dos factores cuantitativos (A y B) y uno categórico (C), las dos combinaciones para los puntos centrales son: $0 - 0 - (-1)$ y $0 - 0 - (+1)$.

Con el uso de puntos centrales se pueden tener dos ventajas. Por un lado, es posible aumentar los grados de libertad del error, cuando ellos son insuficientes (menores a 8). Por supuesto que se podrían aumentar esos grados de libertad aumentando el número de réplicas, pero usualmente los puntos centrales requieren la mitad de corridas que el número completo de tratamientos de una réplica adicional. Eso quiere decir que los puntos centrales deben también replicarse. Es recomendable que el número de veces que debe replicarse el total de

puntos centrales sea igual a la mitad de corridas que representaría hacer una réplica completa de ese experimento.

Esa recomendación no siempre se puede cumplir. En un experimento 2^2 , el número de corridas de una réplica es igual a 4. Por tanto, el número de puntos centrales a experimentar es mínimo de 2. Si hay una sola combinación de factores al centro (todos son cuantitativos), ella debería repetirse dos vez (dos experimentos). Si existen dos combinaciones (porque uno de los factores es categórico), ellas deben repetirse también una vez, pero dando ahora por resultado cuatro experimentos. Lo mismo que una réplica completa. En un diseño factorial 2^3 una réplica comprende ocho corridas. El o los puntos centrales deben repetirse hasta llegar a un mínimo de cuatro. Y así sucesivamente.

Ya se vio que el uso de puntos centrales no siempre disminuye el número de corridas con respecto a la posibilidad de realizar réplicas adicionales completas, pero aun así sigue siendo una alternativa ventajosa, si se trata de factores cuantitativos, porque permite detectar la presencia de curvatura (no linealidad) en al menos uno de los factores que se estudian.

7 REGLA.- Los Coeficientes de Determinación (R^2) y de Determinación Ajustado (R^2_{aj})

para el modelo matemático de predicción de la salida del proceso, que se obtiene mediante el ANOVA, deben ser lo más cercanos posible a 100. Las fórmulas para obtener esos coeficientes de determinación son:

Fórmula 43

$$R^2 = \frac{SC_{\text{total}} - SC_{\text{error}}}{SC_{\text{total}}} \times 100 = \frac{SC_{\text{modelo}}}{SC_{\text{total}}} \times 100$$

$$R^2_{aj} = \frac{CM_{\text{total}} - CM_{\text{error}}}{CM_{\text{total}}} \times 100$$

8 REGLA.- Debe realizarse una VERIFICACIÓN DE LOS SUPUESTOS DEL MODELO para poder aceptar la validez de los resultados obtenidos por medio del ANOVA. Los supuestos a verificar son: Normalidad de los datos de salida del proceso, Varianza Constante de los Tratamientos e Independencia de las mediciones realizadas (aleatoriedad).

Los tres supuestos mencionados pueden verificarse por medio de verificar que los residuos (las diferencias entre el valor predicho por el modelo y el valor realmente medido para cada tratamiento) se comportan como si pertenecieran a una muestra aleatoria extraída de una distribución normal con media cero y varianza constante. Es decir, los residuos deben cumplir tres condiciones: (1) seguir una distribución normal con media igual a cero (2) ser independientes entre sí (3) los residuos procedentes de cada tratamiento deben tener la misma varianza. Por supuesto, existen pruebas analíticas, pero lo usual es utilizar evidencias gráficas que, aunque no son totalmente exactas, en la mayoría de casos son suficientes para aceptar o no los supuestos. En general, en los gráficos de evidencia de cumplimiento de supuestos hace falta que más de dos puntos salgan del comportamiento esperado para admitir que no sólo se trata de puntos aberrantes, si no que se trata de una violación de los supuestos.

Si hay que establecer una escala de la rigurosidad con la que se debe calificar el cumplimiento de cada uno de los supuestos, se puede decir que el requerimiento de independencia es el más importante, y que en el otro extremo la falta de normalidad hasta cierto límite no afecta los resultados prácticos del ANOVA.

NORMALIDAD.- El gráfico de normalidad proporcionado por casi todos los paquetes estadísticos requiere que cuando los Residuos siguen una distribución normal ellos tiendan a quedar alineados en una línea recta. Si no se alinean de forma clara, se puede concluir que el supuesto de normalidad no es correcto. El gráfico que construye el MINITAB tiene la siguiente forma:

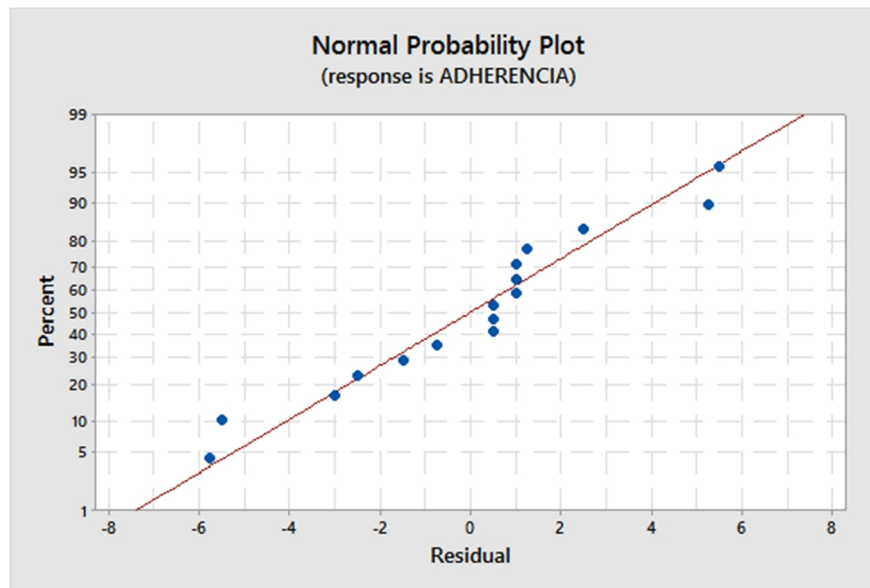


Figura 68: Normalidad de residuos
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

No hace falta que el ajuste a la recta sea perfecto pues el ANOVA resiste moderadas desviaciones de la normalidad. Si es que hubiera dudas sobre la normalidad, se puede recurrir a examinar la normalidad de los datos originales encontrados en las corridas de los tratamientos. De todas maneras, si es que persistieran las dudas sobre la normalidad de los residuos, se puede recurrir a la transformación Box-Cox que ofrecen los paquetes informáticos, antes de ejecutar el ANOVA. Debe aclararse que las transformaciones no eliminan las dispersiones de los datos. Ellas simplemente existen. Sólo estabilizan la varianza y permiten realizar un mejor análisis de los efectos de los factores sobre la salida.

VARIANZA CONSTANTE.- Una manera de verificar este supuesto consiste en graficar los Predichos en el eje X y los Residuos en el eje Y. Si los puntos del gráfico se distribuyen aleatoriamente dentro de una banda horizontal, los residuos y tratamientos tienen igual varianza. Si hay una forma de embudo, entonces no se está cumpliendo el supuesto de varianza constante. Otra gráfica que ayuda a verificar las varianzas es el de niveles de factor contra residuos. En el eje X están los niveles de un factor y en el eje Y están los residuos correspondientes. Si se cumple el supuesto de varianza constante, el grado de dispersión de los puntos en cada nivel del factor tiende a ser similar.

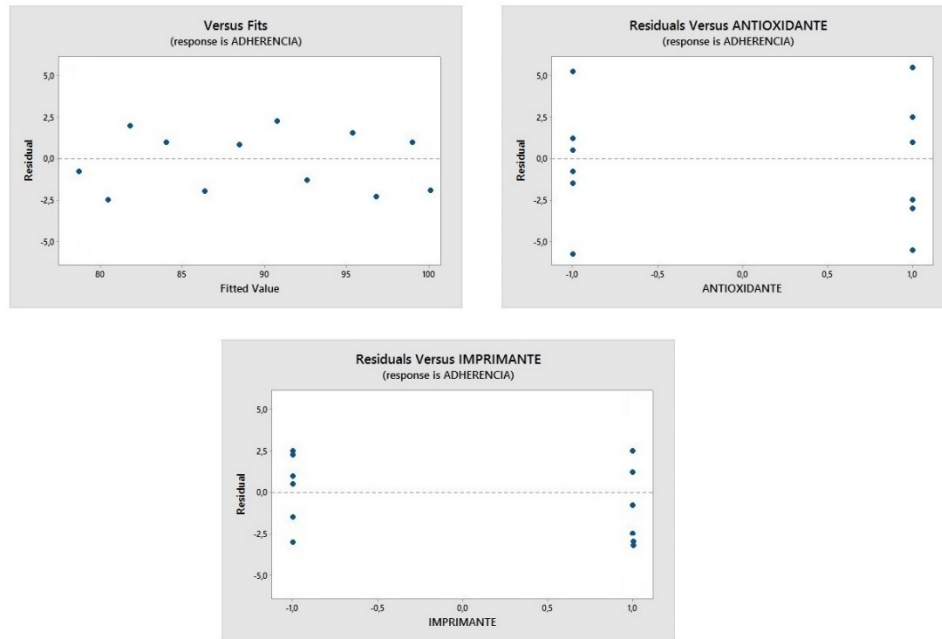


Figura 69: Análisis de varianza constante

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

INDEPENDENCIA.- Para detectarla, se grafican los datos, en el orden en que fueron colectados, contra los residuos correspondientes. En el eje X está el Tiempo y, en el eje Y, los Residuos. Para que se evidencie independencia, los puntos del gráfico deben presentar aleatoriedad dentro de una banda horizontal de ancho razonable. Si no hay independencia, se debe asumir que no se aleatorizaron adecuadamente los tratamientos, o que se presentaron causas asignables durante las corridas. Si no existe independencia, se debe considerar seriamente volver a realizar los experimentos de salidas del proceso estudiado.

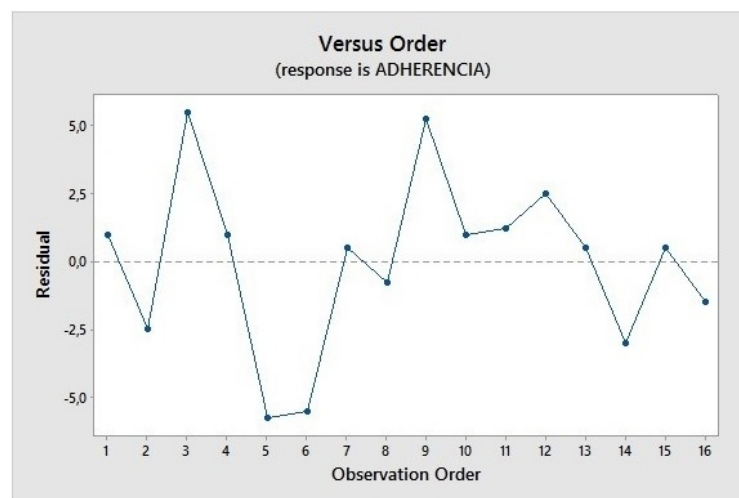


Figura 70: Análisis de independencia

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

4. PROYECTO DESARROLLADO EN UNA PYME DE QUITO

PROYECTO DESARROLLADO EN UNA PEQUEÑA EMPRESA DE QUITO PARA LA MEJORA DE LOS SIGUIENTES PROCESOS DE APLICACIÓN DE PINTURA SOBRE SUPERFICIE METÁLICA:

- APLICACIÓN DE PINTURA LÍQUIDA DE SECAMIENTO AL AMBIENTE
- APLICACIÓN DE PINTURA ELECTROSTÁTICA DE SECAMIENTO AL HORNO
- APLICACIÓN DE PINTURA LÍQUIDA DE SECAMIENTO AL HORNO

LA EMPRESA

OFITEK CIA. LTDA. es una pequeña empresa que tiene como línea principal de trabajo el diseño y fabricación de equipamiento metálico para oficinas, centros de educación y hospitales. Como incluye a la Ingeniería Mecánica en sus actividades industriales, ha incursionado también en la reparación y mantenimiento de pequeñas Centrales Hidroeléctricas de hasta 1.500 KW de potencia y en la fundición de partes metálicas para maquinaria.

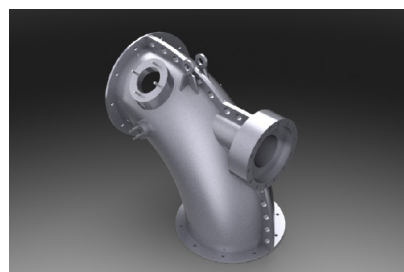


Figura 71: Productos de Ofitek

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En definitiva, todos los productos que diseña, fabrica o mantiene **OFITEK** tienen un elevado componente metálico ferroso: acero, acero inoxidable o fundición. Y todos esos productos, o sus partes y piezas, deben ser adecuadamente protegidos contra el ataque del ambiente, es decir de la corrosión que producen la humedad, la lluvia, el sol, la salinidad, etc. Pero no sólo es importante la pintura protectora por su prevención de la oxidación y de la corrosión, sino además por el uso y por el aspecto estético de los trabajos terminados.

La empresa ha debido desarrollar dos tipos de procesos de pintura, que se aplican de acuerdo con el tipo de producto al que debe darse protección. La pintura puede ser secada al ambiente o secada al horno. Siempre el cocido al horno da una mucho mejor calidad, pero piezas muy grandes no pueden ser horneadas. Entonces, se debe aplicar pintura líquida de secamiento al ambiente. Las pinturas líquidas utilizadas son lacas sintéticas o lacas martilladas. En cuanto a las pinturas horneables, pueden ser líquidas (que permiten una extensa combinación de colores) y en polvo (electrostática, termofundible), que es la de mejor calidad en la actualidad, pero que se consigue en contados colores y tonalidades.

DEFINIR: EL PROCESO Y EL PROBLEMA

En el flujograma de la Figura A-2 se ilustra la selección de los procesos de pintura a aplicar, y las principales actividades que los conforman.

En todos los tipos de procesos se han presentado problemas de calidad en cuanto a la más importante característica de un proceso de pintura: la adherencia. Una mala adherencia no sólo que propicia el futuro apareamiento de problemas cuando el producto ya ha sido instalado y entregado al cliente, sino que antes de la entrega mismo ya es motivo de daños que pueden perjudicar la imagen de la empresa, además de conllevar costos de reparación y reprocesos.

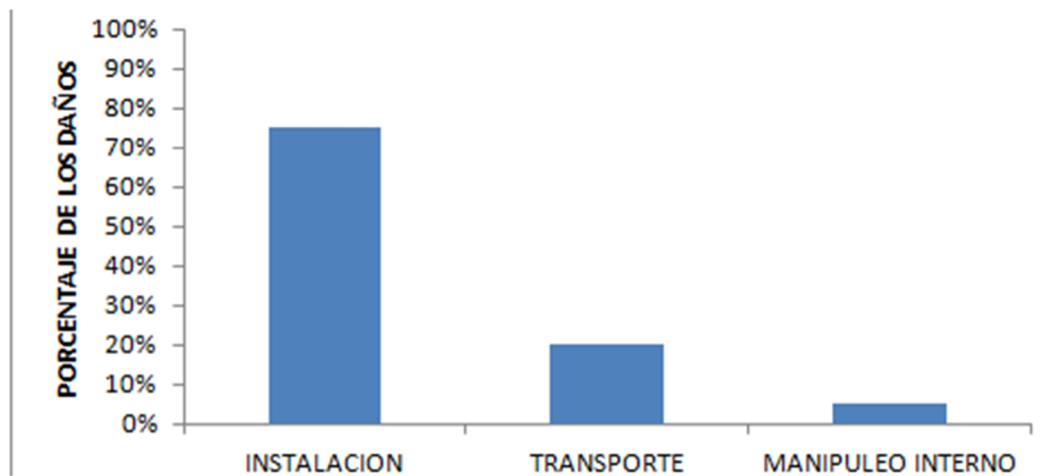


Figura 72: Actividades que causan daño en la pintura
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Una pintura defectuosa significa rayones, desprendimientos, alta sensibilidad al manipuleo y a los golpes, zonas opacas, mal aspecto, oxidación, etc. Todos esos problemas ocurren en la fábrica, en el transporte o en la instalación. Si se detectan en la fábrica, las piezas pueden repintarse. Si se detectan fuera, que es lo más frecuente, se hace necesario un proceso de reparación que nunca deja una protección y un acabado de alta calidad.

Incluso más altos que los costos de reparación y reproceso son los efectos negativos en cuanto al servicio defectuoso que se le da al cliente, que no queda totalmente satisfecho, y a la pérdida de imagen de calidad de la empresa. Por eso es prioritario mejorar la adherencia de la pintura aplicada en cualquiera de los procesos de **DFITEK**. En la actualidad, el rubro pintura puede representar entre un 3% y un 10% del costo total, dependiendo del producto. Se reprocesa o repara aproximadamente el 20% de lo pintado, lo que significa un costo de cerca de USD 15.000,00 al año. Para tener una idea de la dimensión del problema se deberá revisar la capacidad de los procesos en relación con su aptitud para cumplir con las especificaciones entregadas por el cliente, cuando se trata de productos en los que se definen contractualmente

esos parámetros, o por las especificaciones sugeridas por la competencia, especialmente aquella que ha alcanzado elevados niveles de calidad.

Se estima que el mejoramiento de los procesos de pintura es alcanzable, factible y representa un aceptable costo de implementación. Las ventajas obtenidas en cuanto a calidad, imagen y ahorro en trabajos de remediación son de alto impacto. Además, como se verá más adelante, después de aplicar el Diseño Experimental se comprobó que en el caso de la pintura líquida de secamiento al ambiente se puede y se debe suprimir el uso de ciertos insumos, más bien perjudiciales, lo que significa otro importante ahorro de costos.

MEDIR

Existen diversos parámetros para medir la buena calidad de la salida de un proceso de pintura: espesor, adherencia, dureza, nivelación, continuidad de película, opacidad, brillo, durabilidad, resistencia en cámara húmeda y salina, resistencia a la temperatura, resistencia al agua, al desgaste y al impacto, y flexibilidad. Pero, con mucho, la característica más importante es la adherencia, pues ella previene rayaduras, daños en el embalaje, el transporte y la instalación, descascaramientos, daños superficiales, daños por el uso e impide que aparezca óxido entre el metal y la pintura. Por ese motivo, en este trabajo de mejora utilizando la metodología Seis Sigma, la característica a medir y mejorar en la salida de los dos tipos de procesos de pintura que desarrolla la empresa es, precisamente, la adherencia.

Se ha buscado definir un índice técnico para medir la situación actual y la mejora en cuanto a la **adherencia** de la pintura. Debe señalarse que la adherencia obtenida por medio de los procesos que implican secado al horno es absolutamente superior a los que usan el secado al ambiente, por lo que los procedimientos normalizados que se usan para encontrar los índices de adherencia en muestras de los dos tipos de pintura difieren sustancialmente. Esto significa también que los índices obtenidos por esos dos tipos de procedimientos no son comparables.

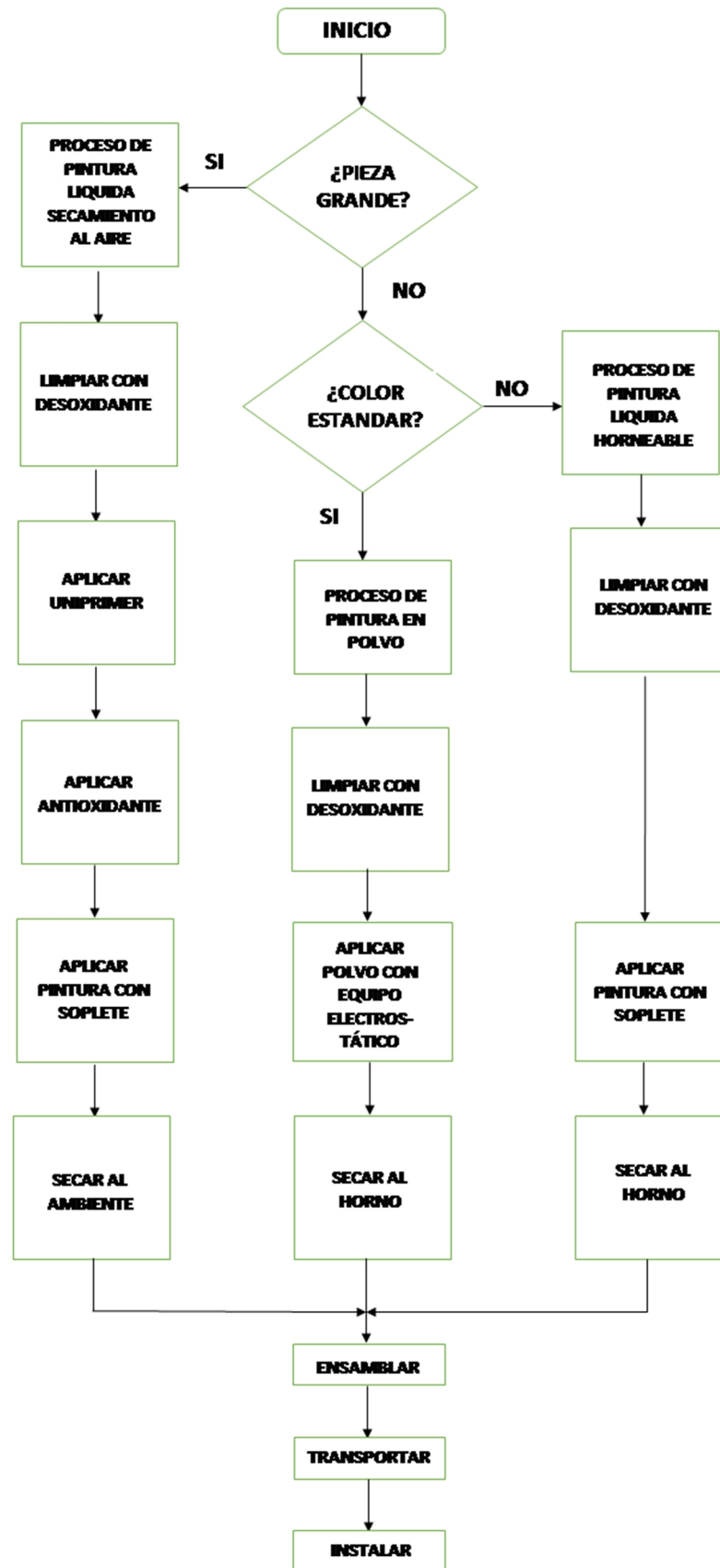


Figura 73: Flujograma del proceso de pintura

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Si se aplicaran los métodos existentes de determinación de adherencia para muestras de pintura de secamiento al aire en muestras de pintura secada al horno, se tendría siempre una adherencia del 100% (la máxima); y si se hiciera lo mismo al revés, la adherencia calculada para muestras de pintura de secamiento al ambiente sería siempre de un 0% (nula).

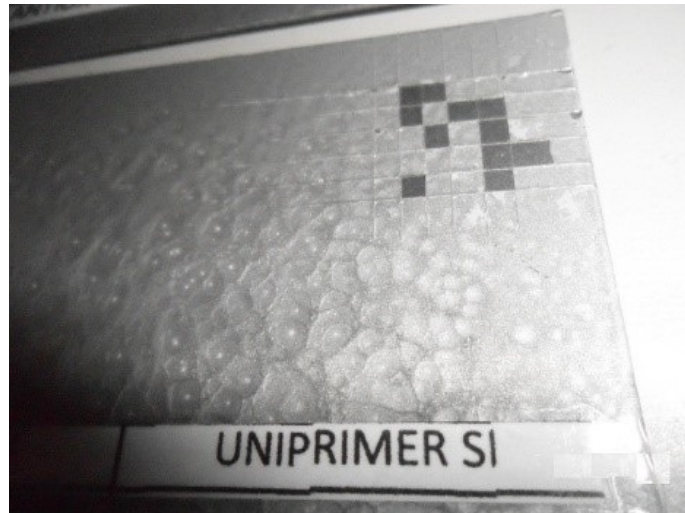


Figura 74: Medición de la adherencia
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En lo que se refiere a las pinturas de secamiento al ambiente, una metodología reconocida como confiable y de fácil aplicación, de costo accesible para la empresa, es el MÉTODO DE DETERMINACION DE LA ADHERENCIA DE LA PINTURA MEDIANTE CINTA ADHESIVA, que arroja **índices porcentuales de adherencia**, y cuyo procedimiento se puede encontrar en el en el ANEXO 27. Básicamente, se rayan con cuchilla metálica varias cuadrículas de 2mm de lado, y después se pega sobre ellas una cinta adhesiva normalizada. Se deja por unos minutos que se estabilice el pegado, y después se desprende violentamente la cinta permitiendo que arranque del sustrato metálico las cuadrículas de baja adherencia. Si se divide las cuadrículas no desprendidas por el total de cuadrículas que se rayaron al inicio, ese es el INDICE PORCENTUAL DE ADHERENCIA.

Para los procesos de secamiento al horno, el método descrito anteriormente no sirve porque el poder de arranque de la cinta adhesiva es insuficiente como para desprender una sola cuadrícula de pintura, y por ello se usa el MÉTODO DE DOBLADO Y CEPILLADO CON CEPILLO METÁLICO. Una vez trazadas las cuadrículas, por medio de la cuchilla que rasga la pintura y llega hasta la superficie metálica, se dobla la probeta de muestra en un ángulo de 90° en la mitad del área en que están las cuadrículas, y en esa zona doblada se procede a aplicar un cepillo normalizado de cerdas de acero un contado número de veces en una dirección de las cuadrículas, y el mismo número de veces en dirección perpendicular a la anterior. De esta manera se logra desprender cuadrículas de pintura, y así se puede calcular el respectivo índice de adherencia.

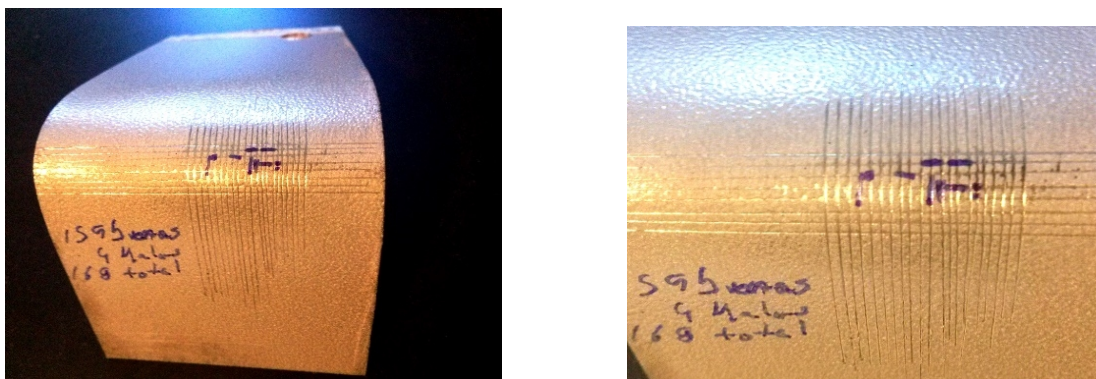


Figura 75: Medición de la adherencia

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Una vez perfeccionados los métodos para medir la adherencia, se procedió a obtener de forma aleatoria muestras de subgrupos racionales desde los dos procesos de pintura (secamiento al aire: lacas sintéticas y lacas martilladas; horneables: líquidas y electrostáticas), a fin de construir sus cartas de control, determinar sus capacidades a corto y largo plazo y su grado de normalidad. Cuando fue posible, por razones de oportunidad en el flujo productivo, los subgrupos racionales tuvieron un tamaño $n=4$. En otros casos, se pudo obtener subgrupos racionales sólo de tamaño $n=2$. Se considera que se trabajó con números y tamaños de

subgrupos suficientes. Los resultados de la medición de muestras extraídas de la línea de pintura fueron los siguientes:

Tabla 27:

Datos de adherencia de lacas líquidas de secamiento al ambiente

SUBGRUPO 1	SUBGRUPO 2	SUBGRUPO 3	SUBGRUPO 4	SUBGRUPO 5	SUBGRUPO 6	SUBGRUPO 7	SUBGRUPO 8
49,5	99,5	12	100	48	70	8	40
88	100	50	100	80	62	18	98

Tamaño Subgrupo Racional (n) = 2

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Tabla 28:

Datos de adherencia de lacas líquidas martilladas de secamiento al ambiente

SUBGRUPO 1	SUBGRUPO 2	SUBGRUPO 3	SUBGRUPO 4	SUBGRUPO 5	SUBGRUPO 6	SUBGRUPO 7	SUBGRUPO 8
100	96	83,5	78	76	100	100	99
99	86	100	100	100	98	100	100

Tamaño Subgrupo Racional (n) = 2

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Tabla 29:

Datos de adherencia de pintura líquida horneable

SUBGRUPO 1	SUBGRUPO 2	SUBGRUPO 3	SUBGRUPO 4	SUBGRUPO 5	SUBGRUPO 6	SUBGRUPO 7	SUBGRUPO 8
72,02	80,95	89,29	83,93	82,14	76,19	92,24	96,17
76,96	71,43	83,93	78,57	85,6	95,24	81,2	57,14

Tamaño Subgrupo Racional (n) = 2

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Tabla 30:**Datos de adherencia de pintura electrostática**

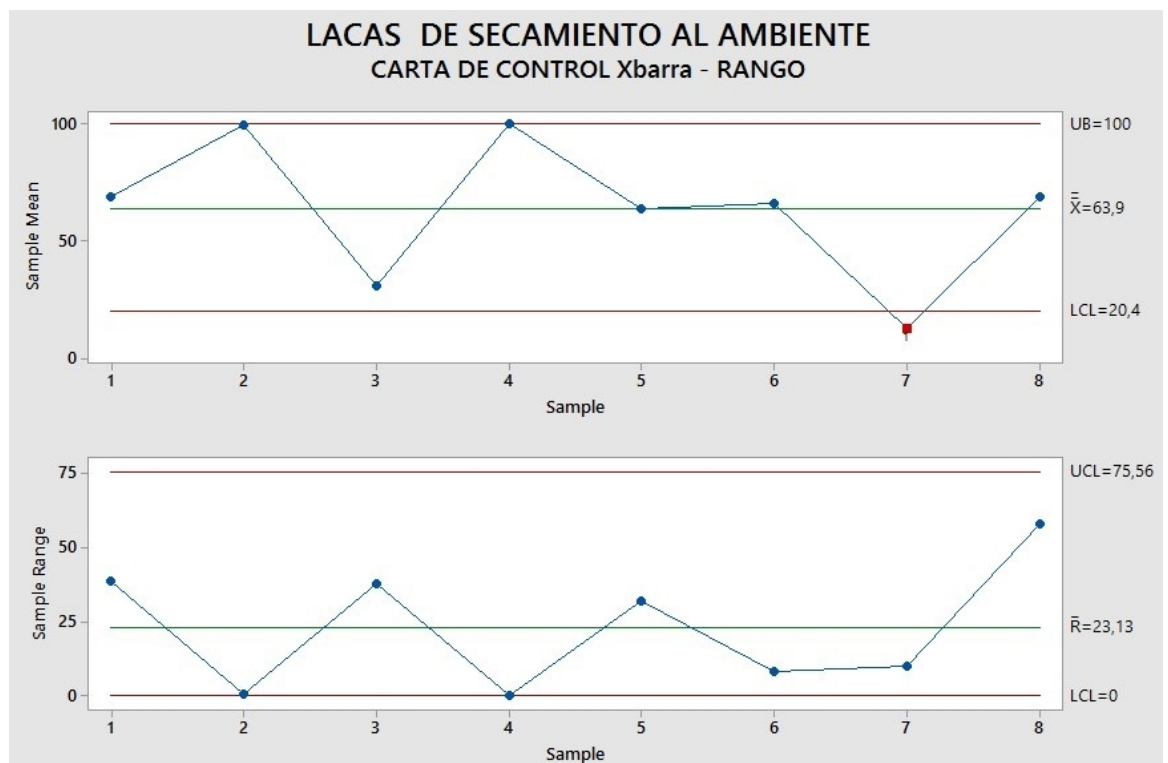
SUBGRUPO 1	SUBGRUPO 2	SUBGRUPO 3	SUBGRUPO 4	SUBGRUPO 5	SUBGRUPO 6	SUBGRUPO 7	SUBGRUPO 8	SUBGRUPO 9
100	100	99,57	100	96,98	94,83	97,62	97,62	86,9
96,43	85,12	99,4	94,64	94,64	96,43	98,71	92,86	95,68
100	100	91,67	100	100	97,84	91,38	98,21	94,94
95,83	95,83	95,24	95,24	97,62	100	100	100	89,29

Tamaño Subgrupo Racional (n) = 4

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

NOTA: TENER PRESENTE QUE LOS ÍNDICES DE ADHERENCIA OBTENIDOS PARA PINTURAS DE SECAMIENTO AL AIRE Y PARA PINTURAS DE SECAMIENTO AL HORNO NO SON COMPARABLES. SÍ LO SON DENTRO DE LA RESPECTIVA CATEGORÍA.

Las cartas de Control \bar{X} – R obtenidas en el MINITAB para los diferentes procesos son:

**Figura 76:** Carta \bar{X} – R lacas de secamiento al ambiente

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

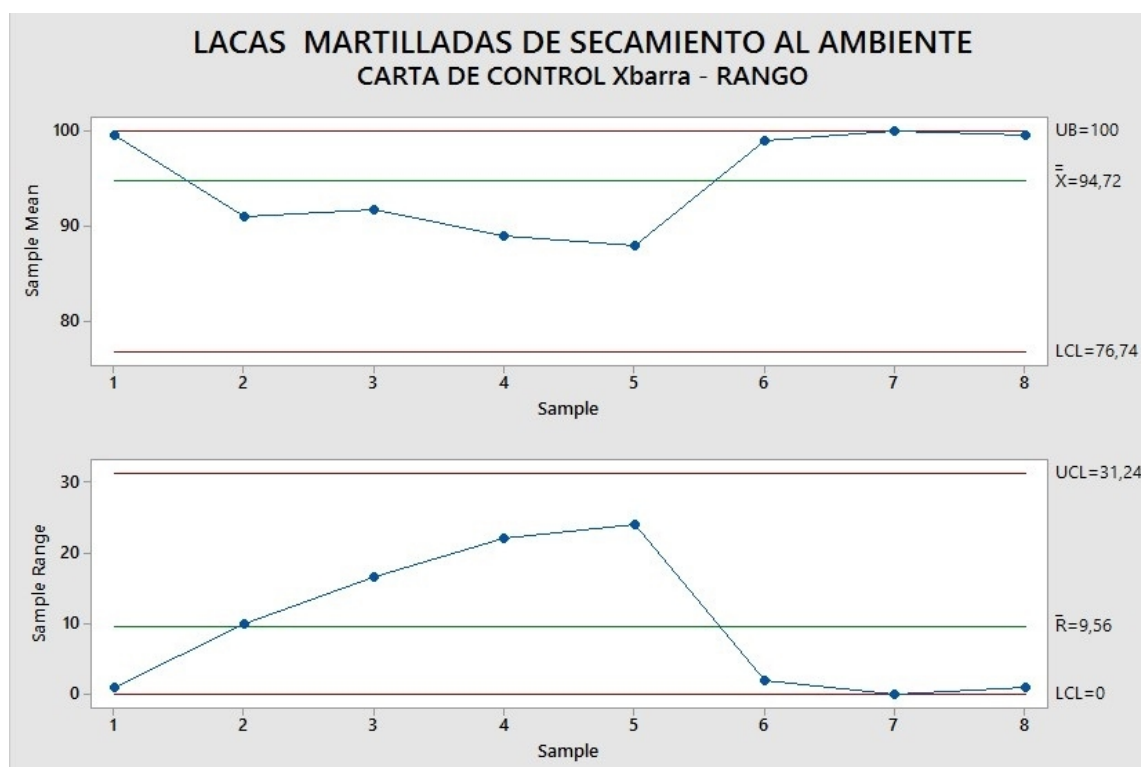


Figura 77: Carta \bar{X} – R lacas martilladas de secamiento al ambiente

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

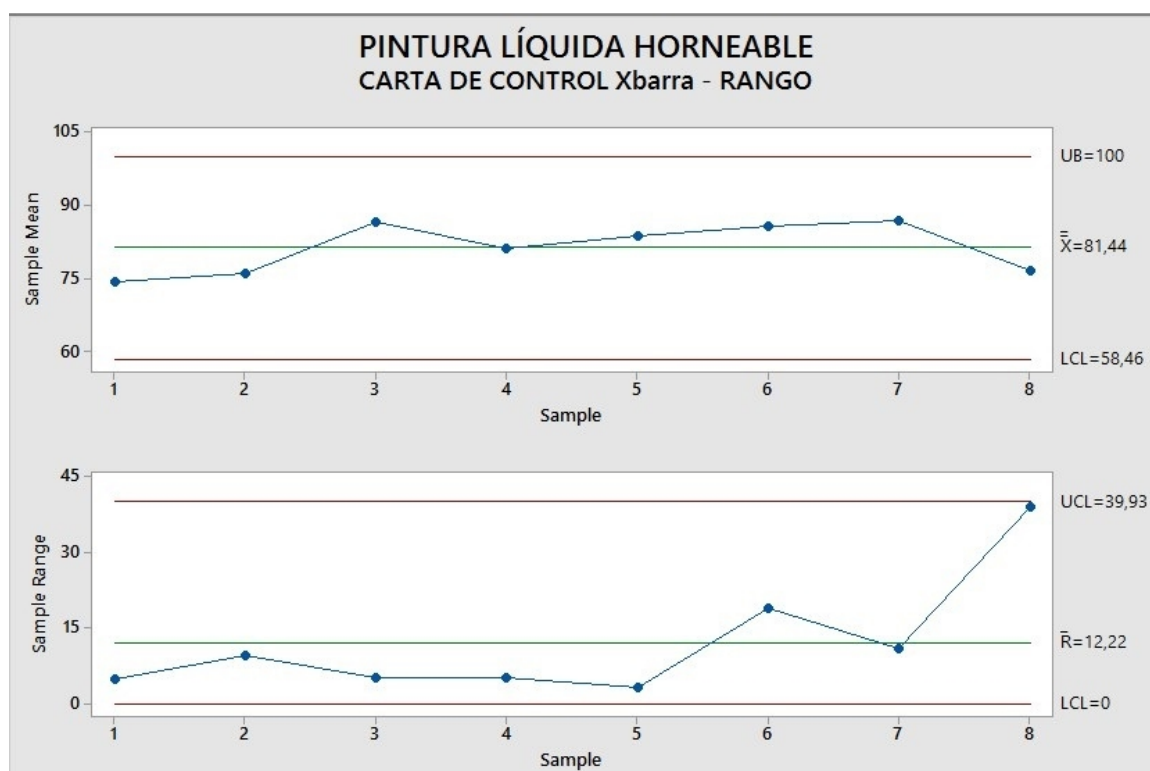


Figura 78: Carta \bar{X} – R pintura líquida horneable

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

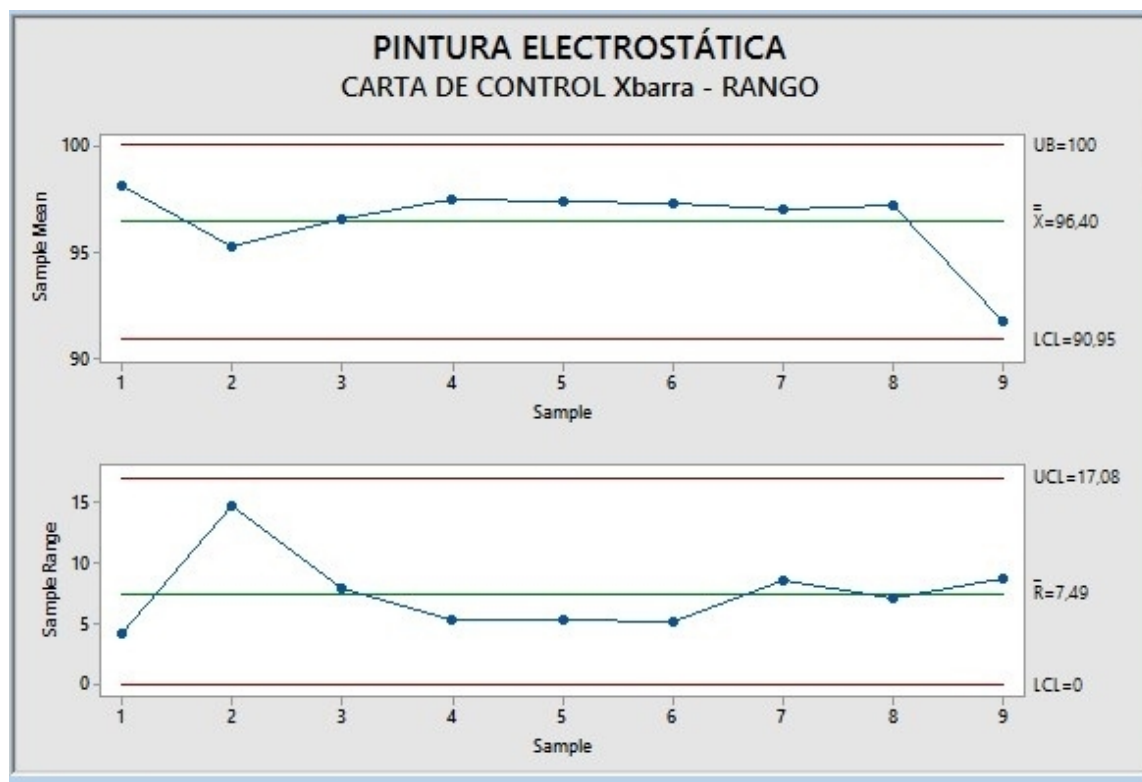


Figura 79: Carta \bar{X} - R pintura electrostática

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Una comparación de las gráficas de las medias, indica los siguientes promedios de los promedios de adherencia para los distintos tipos de pintura:

Tabla 31:

Medias de las medias de adherencia de las diferentes pinturas

TIPO DE PINTURA	MEDIA DEL PORCENTAJE DE ADHERENCIA
LACA SINTÉTICA DE SECAMIENTO AL AMBIENTE	63,90%
LACA MARTILLADA DE SECAMIENTO AL AMBIENTE	94,72%
LÍQUIDA HORNEABLE	81,44%
ELECTROSTÁTICA HORNEABLE	96,40%

NOTA: TENER PRESENTE QUE LOS ÍNDICES DE ADHERENCIA OBTENIDOS PARA PINTURAS DE SECAMIENTO AL AIRE Y PARA PINTURAS DE SECAMIENTO AL HORNO NO SON COMPARABLES. SÍ LO SON DENTRO DE LA RESPECTIVA CATEGORÍA.

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Para cada categoría, se puede apreciar que, basados en las medias, los mejores resultados se obtienen con las variedades que usan laca martillada de secamiento al ambiente y

pintura electrostática, respectivamente. Por supuesto se debe considerar que la laca martillada se debe secar al menos cuarenta y ocho horas para alcanzar su máximo grado de adherencia, mientras que la pintura electrostática sale del horno con su propio nivel de adherencia después de 35 minutos, como máximo.

Si se debe analizar la capacidad del proceso, su potencia para poder cumplir con especificaciones proporcionadas por el cliente, la norma o el medio, la media por sí sola dice muy poco. Es necesario ver si seis desviaciones estándar de los datos obtenidos para cada proceso caben entre sus propias especificaciones. Además, debe establecerse si la media de cada proceso está alineada con la mitad de la distancia entre la Especificación Superior y la Especificación Inferior. Si es que los datos de un proceso no siguen una distribución normal, la capacidad se debe analizar previa transformación de normalización por medio de percentiles o por el método Box-Cox. En este proyecto se utilizará el método Box-Cox.

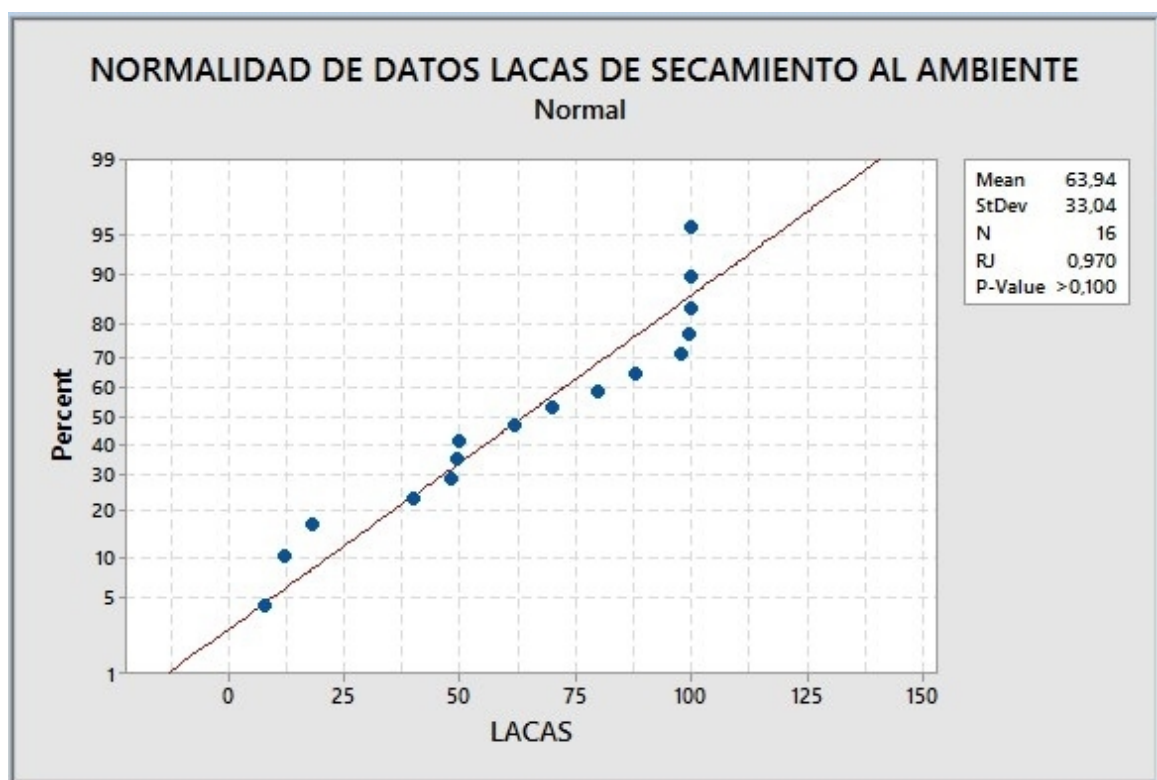


Figura 80: Normalidad lacas de secamiento al ambiente
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

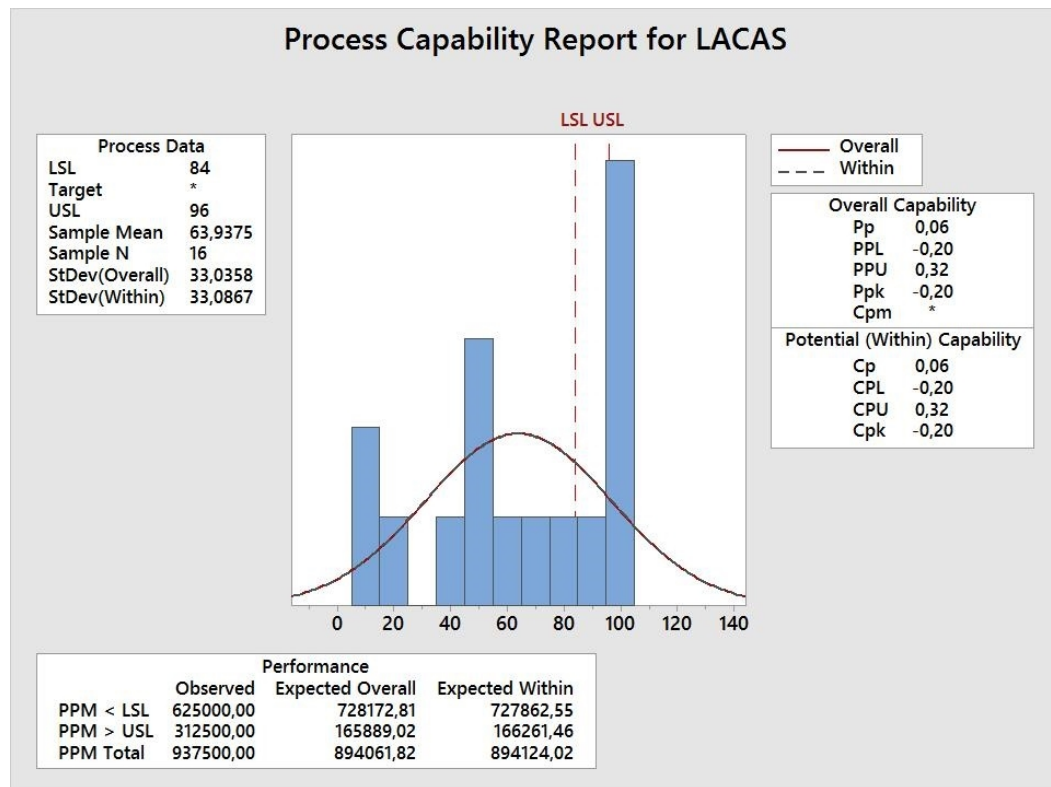


Figura 81: Capacidad de proceso - lacas de secamiento al ambiente

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

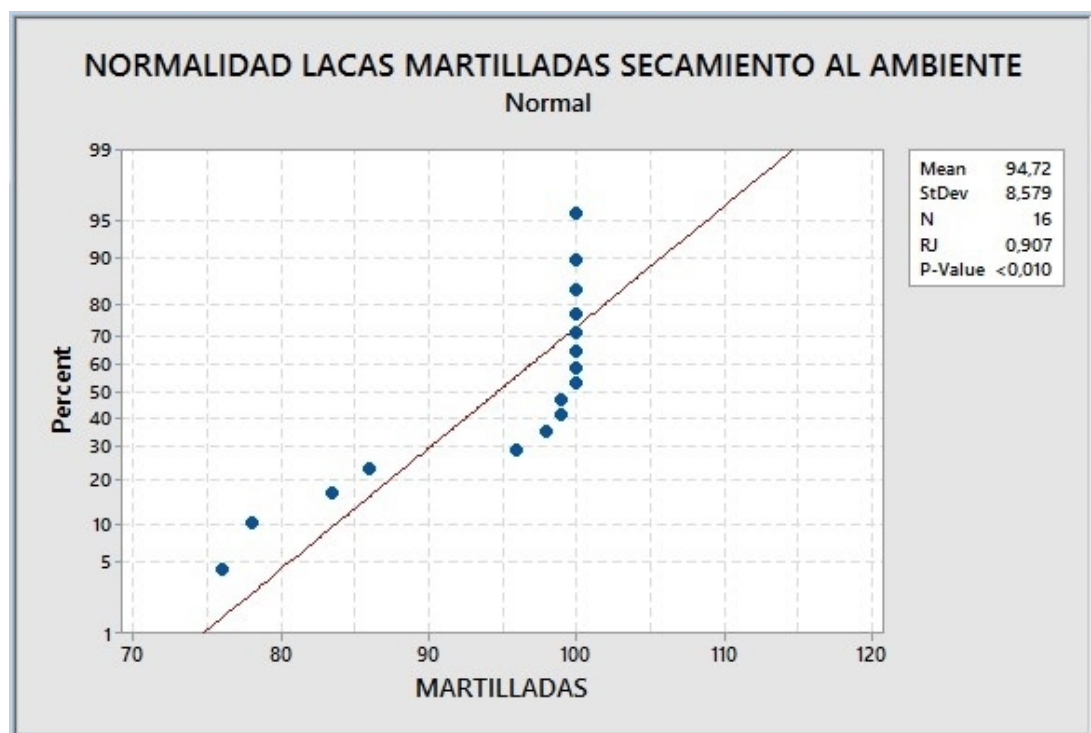


Figura 82: Normalidad lacas martilladas de secamiento al ambiente

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

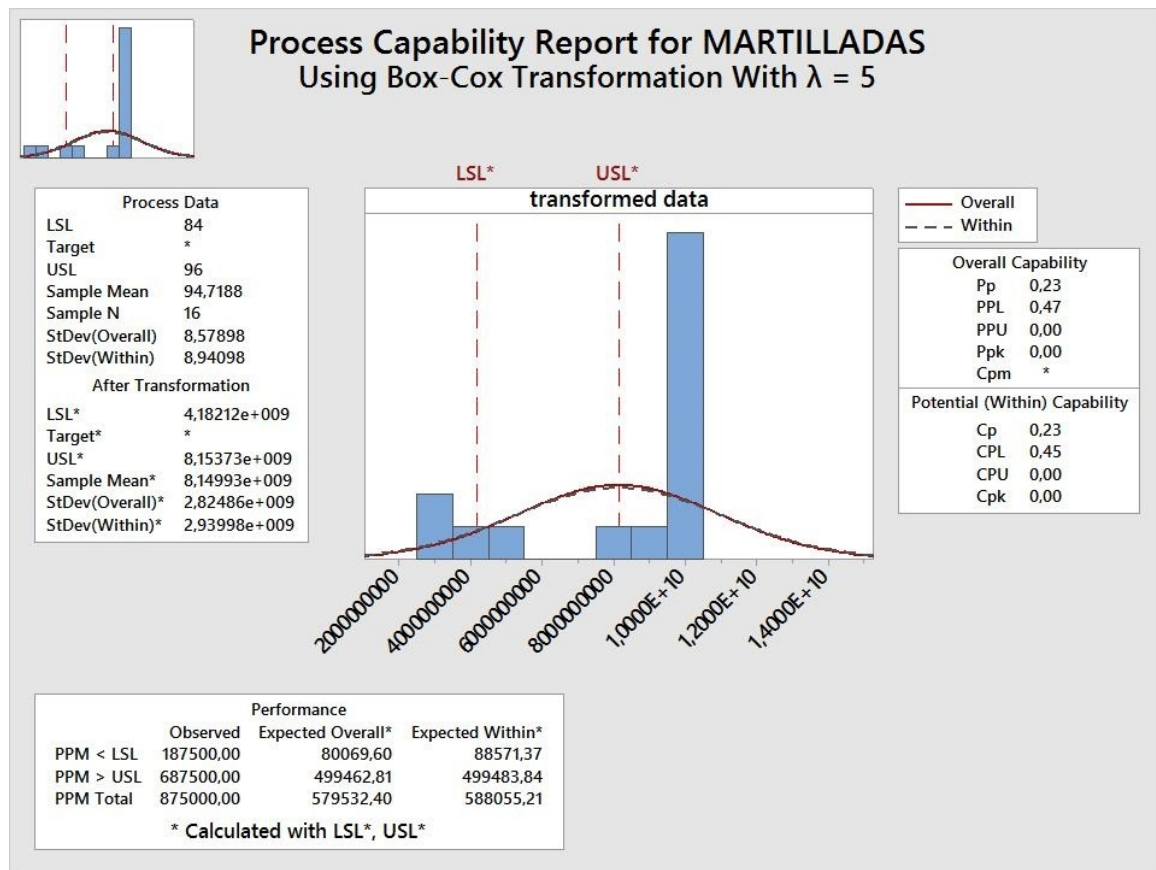


Figura 83: Capacidad de proceso - lacas martilladas de secamiento al ambiente
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

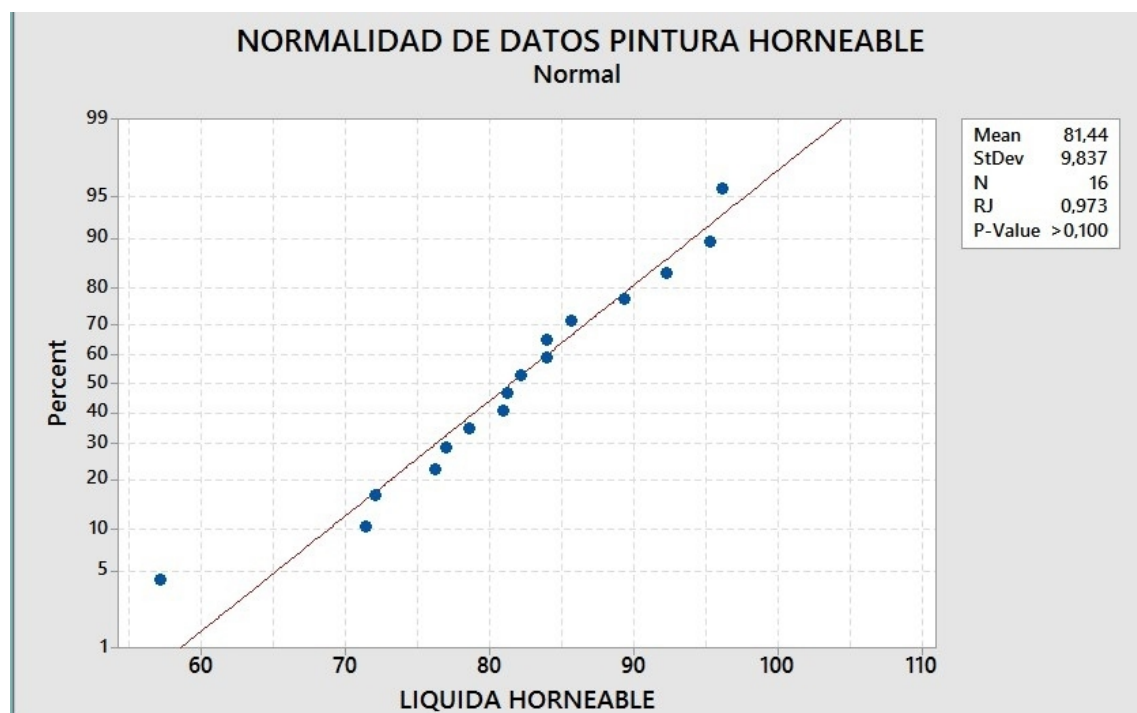


Figura 84: Normalidad pintura líquida horneable
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

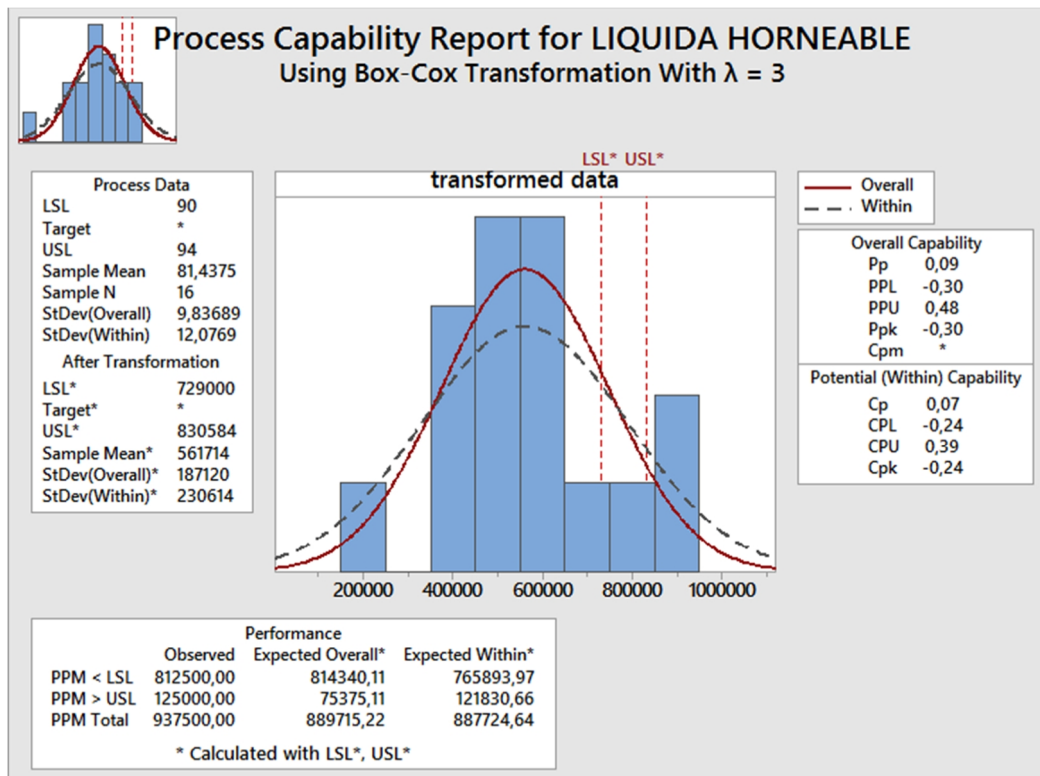


Figura 85: Capacidad de proceso - pintura líquida horneable

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

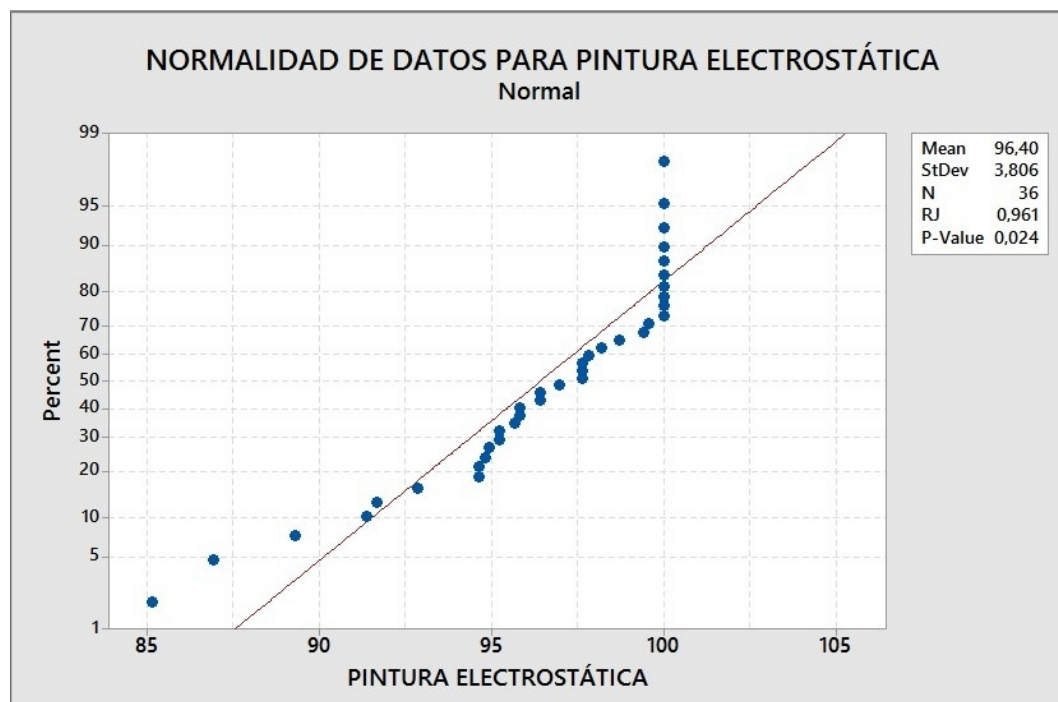


Figura 86: Normalidad pintura electrostática

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

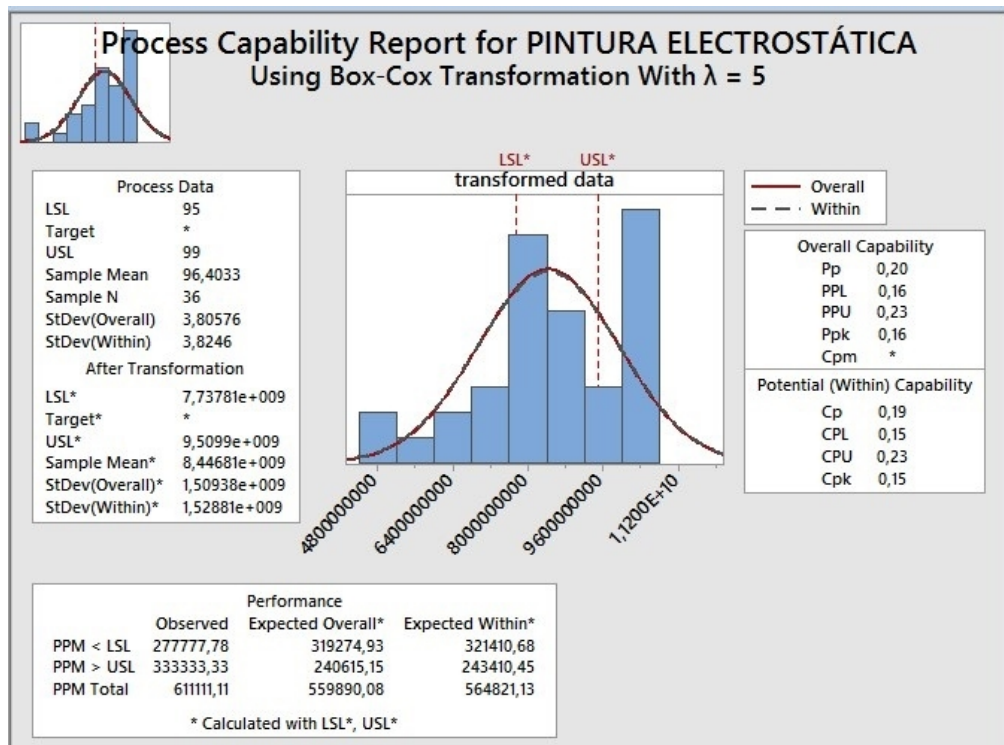


Figura 87: Capacidad de proceso - pintura electrostática
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

ANALIZAR-MEJORAR

En lo que se refiere a las Cartas de Control, puede verse que todos los procesos se encuentran fuera de control estadístico. En varios casos existen puntos fuera de los límites de control; y en otros, tanto en cartas de medias como en cartas de rangos, los puntos forman estratificaciones y difícilmente puede decirse que siguen una distribución aleatoria. Es evidente la presencia de causas especiales de variación.

Empezando con la condición de normalidad, que debe cumplir todo proceso que se desempeña bien, se puede ver que dos procesos (lacas líquidas de secamiento al aire y pintura líquida horneable) cumplen con dicha condición, al tener un p-value mayor que 0,05. A los otros dos procesos se les tuvo que aplicar la transformación Box-Cox para poder calcular los índices de capacidad. Sí debe tenerse presente que cualquier proceso de pintura tiene un límite a la

derecha, en el 100% (que es la meta a alcanzar), por lo que siguen intrínsecamente una distribución asimétrica, que se aleja de una normal perfecta.

Las especificaciones que se encuentran en el medio para los tipos de procesos de pintura que se analizan son:

Tabla 32:
Especificaciones para los procesos de pintura

TIPO DE PINTURA	ESPECIFICACIÓN (% DE ADHERENCIA)
PINTURAS LÍQUIDAS DE SECAMIENTO AL AMBIENTE (INCLUYE LAS MARTILLADAS)	$90 \pm 6 \%$
PINTURAS LÍQUIDAS DE SECAMIENTO AL HORNO	$92 \pm 2 \%$
PINTURAS ELECTROSTÁTICAS DE SECAMIENTO AL HORNO	$97 \pm 2 \%$

NOTA: TENER PRESENTE QUE LAS ESPECIFICACIONES DE ADHERENCIA OBTENIDOS PARA PINTURAS DE SECAMIENTO AL AIRE Y PARA PINTURAS DE SECAMIENTO AL HORNO NO SON COMPARABLES.

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Los índices de capacidad a corto y largo plazo, tanto asumiendo centramiento como calculándolos en relación con su descentramiento respecto de la mitad del rango de especificación, indican una calidad defectuosa, si se los califica de acuerdo con los criterios de la Tabla 26 y del ANEXO 20. En base a las especificaciones, se encuentran los siguientes índices de capacidad:

Tabla 33:
Índices de capacidad de los procesos de pintura

PINTURA	C_p	C_{pk}	P_p	P_{pk}	Z_L	DEFECTUOSOS ESPERADOS	OBSERVACIONES
Laca sintética líquida de secamiento al aire	0,15	-0,09	0,10	-0,06	0	50%	Proceso no adecuado
Laca martillada de secamiento al aire	0,06	-0,20	0,06	-0,20	0	50%	Proceso no adecuado
Líquida de secamiento al horno	0,07	-0,24	0,09	-0,30	0	50%	Proceso no adecuado
Electrostática de secamiento al horno	0,19	0,15	0,20	0,16	0,47	32%	Proceso no adecuado

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Todos los procesos, evaluados con los índices de capacidad a largo plazo, son calificados con niveles Seis Sigma cero o cercanos a cero. Por eso ocurren la cantidad de reprocesos y arreglos que se ven en la práctica. La variabilidad es excesiva, y ello se hace evidente en la notable anchura de las campanas de Gauss. Son descentrados y no siguen una distribución normal. Si es que en la práctica no se llega al rango de defectuosos predicho del 30% - 50%, posiblemente se debe a que en pocas ocasiones el cliente recibe el producto ejecutando ensayos de calidad de la pintura aplicada. Esas son las líneas de base.

En definitiva, es indispensable analizar los dos procesos de pintura, mejorarlos utilizando un diseño factorial 2^k e, incluso, detectar si alguno de esos procesos, por asuntos técnicos irremediables, debe ser eliminado definitivamente del ejercicio productivo de *DFITEK*.

En la mejora de los procesos de pintura, se debe empezar por determinar los factores que inciden en su salida (la adherencia), utilizando para ello las herramientas que recomienda la metodología Seis Sigma. Existe un conocimiento acumulado de varios años sobre los procesos de pintura por parte de los trabajadores de la empresa, por lo que es posible plantear a priori los factores que probablemente son significativos para la adherencia.

En los dos tipos de proceso de pintura (si se bloquean el tipo de pintura, el operador, el equipo y en lo posible las condiciones ambientales) el grado de adherencia depende en alto grado de la preparación de la superficie a pintar. Cuando se trata de lacas de secamiento al ambiente, la preparación de la superficie ferrosa (sustrato metálico ferroso), se realiza por medio de **desoxidantes, imprimantes y antioxidantes** que limpian las superficies metálicas de óxido, previenen la oxidación, le proporcionan una delgada capa de fosfato y, según los proveedores de pinturas, elevan el nivel de adherencia. En el caso de las pinturas horneables, además de la preparación de la superficie, pueden ser significativos los factores: temperatura

del horno, tiempo de horneado y el tiempo que transcurre entre el momento en que se preparó la superficie a pintar y el momento en que pinta la pieza.

FACTORES DE ENTRADA EN EL PROCESO CON LACAS DE SECAMIENTO AL AMBIENTE

El análisis en grupos de trabajo da por resultado que existen varios factores que inciden en la salida del proceso de pintura de secamiento al aire.

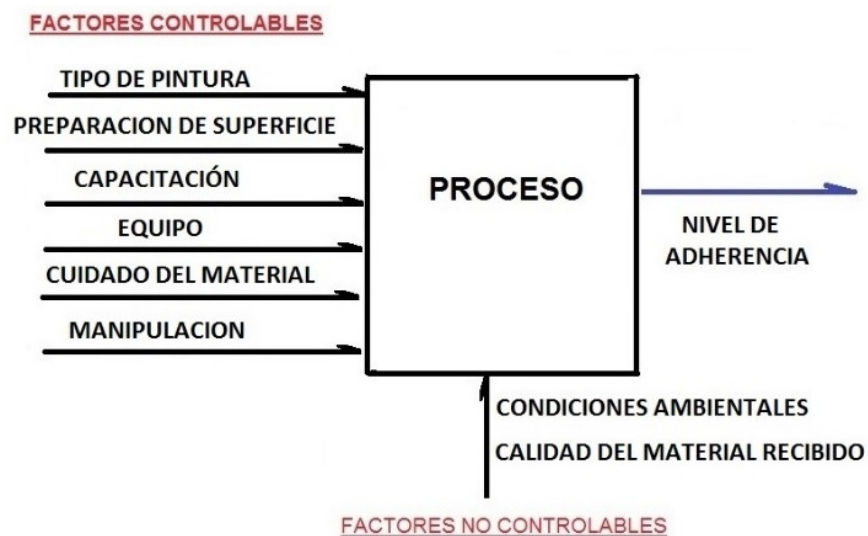


Figura 88: Factores de entrada - lacas de secamiento al ambiente
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Respecto de los procesos de pintura que usan lacas líquidas de secamiento al ambiente, las cartas de control de medias indicaron que las llamadas lacas martilladas tienen los mejores porcentajes de adherencia. Por tanto, se decide bloquear este factor restringiéndolo exclusivamente a este tipo de pintura. En adelante, de requerirlo, la empresa sólo utilizará lacas martilladas.

Los factores Capacitación, Equipo, Cuidado del Material y Manipulación se han mejorado hasta alcanzar niveles que se puedan considerar estándar para la empresa. Los mismos pintores utilizarán en las corridas el mismo equipo y materiales, por lo que son factores que también

pueden ser bloqueados. Los factores no controlables son causantes de error y de variaciones aleatorias, y deben eliminarse por medio de réplicas.

Por tanto, el único factor que permanece como no bloqueado, y que se ha definido como necesario de analizar por medio del Diseño Experimental es la preparación de la superficie. Actualmente, la preparación de la superficie comprende tres etapas: limpieza con desoxidante DESOXICONDOR, imprimación con UNI-PRIMER 732 AU y aplicación de anticorrosivo ANTIOX SERIE 900. La limpieza con antioxidante es indispensable e ineludible, por lo que se puede bloquear también, pero el uso (recomendado por los proveedores de insumos de pintura) de los otros dos químicos siempre ha sido objeto de cuestionamiento por los pintores de la empresa, debido a la falta de contundencia en la mejora del nivel de adherencia.

Por medio del Diagrama de Ishikawa, el análisis para la falta de buena adherencia es el siguiente:

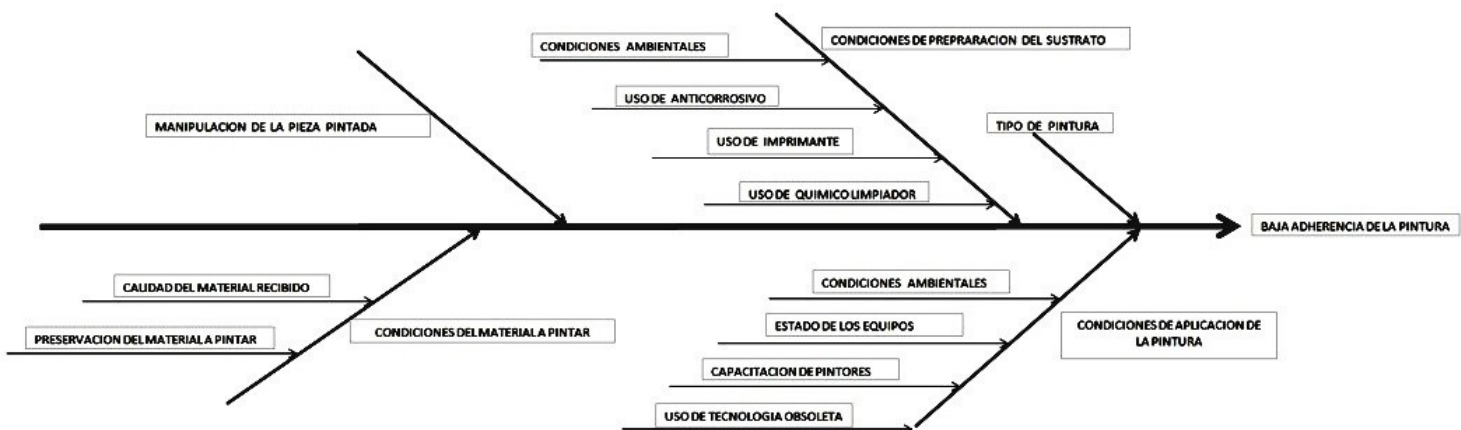


Figura 89: Diagrama de Ishikawa - lacas de secamiento al ambiente

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Un análisis similar al ya expuesto ratifica el cuestionamiento sobre el uso del Imprimante y del Antioxidante. Por tanto, se decide planificar un Diseño Experimental en el que estos dos químicos sean los factores de entrada A y B, que varían en los niveles SI – NO, o sea SE APLICA – NO SE APLICA (+1 –1), como se ve en el siguiente figura. Debe anotarse que, debido a los altos

precios de los imprimantes y los antioxidantes, los resultados de significación o no de estos factores son de interés económico para *DFITEK*.

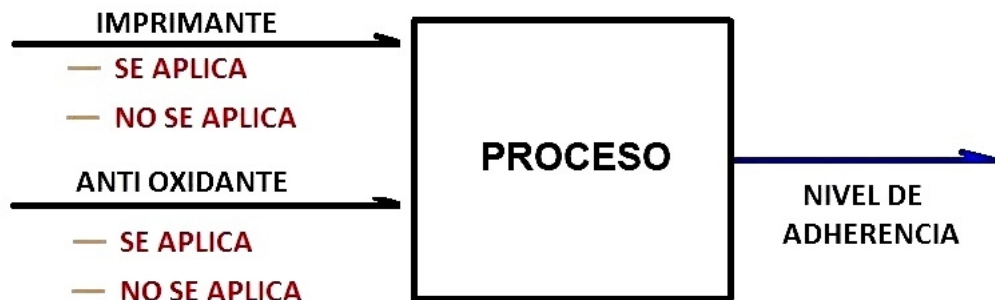


Figura 90: Diseño factorial 2^k - lacas martilladas de secamiento al ambiente
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

FACTORES DE ENTRADA EN EL PROCESO CON PINTURAS HORNEABLES

El análisis en los grupos de trabajo indica que los factores de entrada para las pinturas horneables (líquida y en polvo) son los mismos que para las pinturas de secamiento al ambiente, pero que se añaden la temperatura del horno (el tiempo de horneado es dependiente de la temperatura del horno, pues la pieza a cocer está dentro del horno desde que éste empieza a calentarse, y se saca en cuanto el horno alcanza la temperatura especificada) y el tiempo que transcurre entre la preparación de la superficie y la aplicación de la pintura horneable. Dicho tiempo es necesario de limitar en cualquier caso, pero es especialmente importante al tratarse de pintura en polvo porque el grado de atracción electrostática que ejerce la pieza metálica cargada sobre las partículas de pintura depende bastante de la limpieza de la superficie, especialmente en lo que se refiere al óxido. En cuanto una pieza metálica termina de limpiarse y prepararse, empieza de inmediato otra vez el proceso de oxidación sobre su superficie.



Figura 91: Factores de entrada - pinturas horneables
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En este caso, la preparación de la superficie consta sólo de una fase, que es la limpieza con desoxidante. No hace falta la aplicación de químicos adicionales. La lógica de bloqueo de factores es la misma que se mencionó para el caso de las lacas de secamiento al ambiente. Además se desea limitar la pintura horneable a un solo tipo (líquida o en polvo, pero no las dos), de manera que sólo quedan tres factores para los cuales probar la significancia: (A) tiempo desde preparación de la superficie, (B) temperatura del horno y (C) el tipo de pintura horneable. Para cada factor se han definido dos niveles, que se probarán en el diseño experimental:



Figura 92: Diseño factorial 2^k - pinturas horneables
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Los niveles para los factores (A) y (B) se determinaron por medio de pruebas preliminares que indicaran para qué valores de los mismos la salida del proceso presentaba variaciones susceptibles de ser utilizadas por el ANOVA.

DISEÑO FACTORIAL 2^K PARA LACA MARTILLADA DE SECAMIENTO AL AMBIENTE

En el caso de la laca martillada de secamiento al ambiente, se debe probar la significación del efecto en la ADHERENCIA de (A) la aplicación de imprimantes y (B) la aplicación de antioxidantes (y por supuesto también de su combinación). Son dos factores, que equivalen a cuatro tratamientos. Se realizarán cuatro réplicas, por lo que el número de corridas es de 16.

Los estándares de combinaciones están dados por la tabla:

Tabla 34:
Combinaciones estándar para dos factores

FACTORES -- → ESTÁNDAR	A	B
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+
5	-	-
6	+	-
7	-	+
8	+	+
9	-	-
10	+	-
11	-	+
12	+	+
13	-	-
14	+	-
15	-	+
16	+	+

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Los experimentos se aleatorizan para su ejecución y se obtienen los siguientes resultados de adherencia:

Tabla 35:

Datos de adherencia. Lacas martilladas. Proceso sin mejora.

FACTORES → ESTÁNDAR	ORDEN	ADHERENCIA
1	13	100
2	9	84
3	4	100
4	3	86
5	7	100
6	8	78
7	1	100
8	12	83
9	16	98
10	5	73
11	10	100
12	2	78
13	15	100
14	11	80
15	14	96
16	6	75

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El proceso en el MINITAB de los datos obtenidos, arroja los siguientes resultados:

INTERACCIÓN

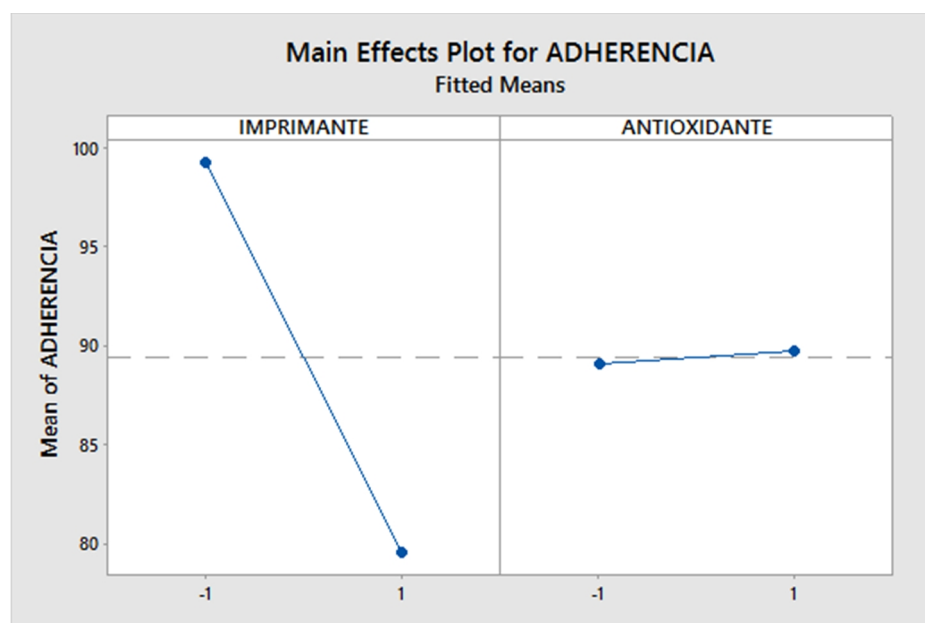


Figura 93: Interacciones principales Imprimante y Antioxidante
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El gráfico de efectos principales indica que el Imprimante tiene que ver con la adherencia, pero negativamente. No ayuda a la adherencia, si no que la perjudica, al contrario de lo afirmado por los comercializadores de pintura. El Imprimante no debería ser utilizado por la empresa en los procesos de pintura con laca martillada de secamiento al ambiente. El Antioxidante prácticamente no tiene incidencia, en lo que a adherencia se refiere. Puede ser que este químico ayude a prevenir a largo plazo la oxidación de la pieza metálica pintada pero, en cuanto a ayudar a la adherencia, definitivamente no tiene efecto. Para estar seguros, deben analizarse los resultados del ANOVA. Un panorama adicional de los efectos lo proporciona la interacción de A y B.

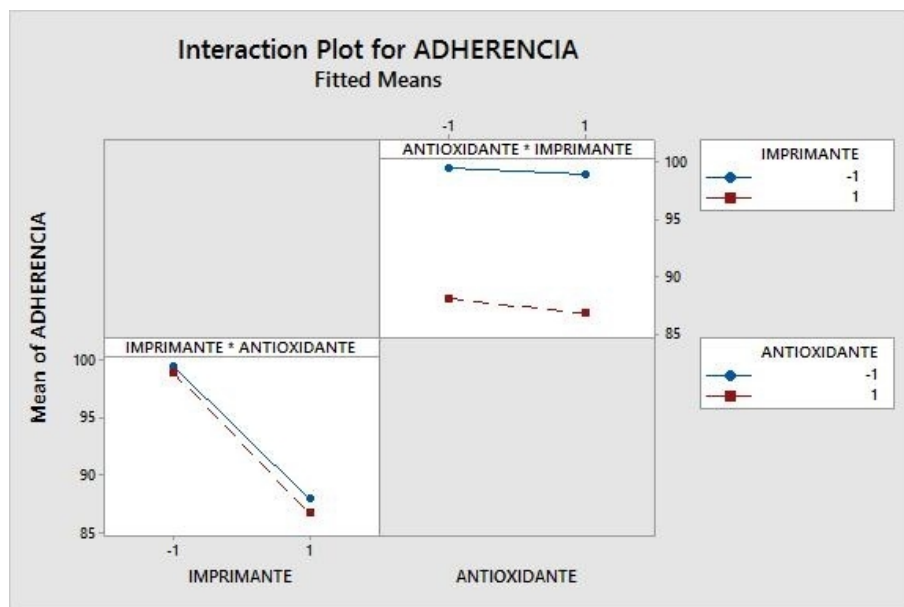


Figura 94: Interacción Imprimante-Antioxidante

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Los gráficos indican que imprimante y antioxidante no tienen interacción en absoluto. Sólo con esos resultados ya se tiene claro lo que se debe hacer para mejorar el proceso de pintura con laca martillada de secamiento al ambiente: eliminar totalmente el uso de Imprimante y de Antioxidante de la preparación de la superficie metálica. Esta decisión está estadísticamente sustentada y es importante porque significa para la empresa un ahorro de USD 5.000 anuales aproximadamente.

Para analizar las significancias incidentes en el proceso, se procede a ejecutar el análisis de varianza, ANOVA, en el MINITAB. Como siempre, esta prueba de hipótesis utiliza el estadístico F_0 que sigue una distribución F cuando la hipótesis nula es cierta. Las hipótesis nulas y alternativas son:

H_0 : Efecto A = 0

H_0 : Efecto B = 0

H_0 : Efecto AB = 0

H_A : Efecto A \neq 0

H_A : Efecto B \neq 0

H_A : Efecto AB \neq 0

Los resultados reportados por el MINITAB son los siguientes:

Source	DF	SS	MS	F-Value	P-Value
Model	3	1547,19	515,73	41,05	0,000
IMPRIMANTE	1	1540,56	1540,56	122,63	0,000
ANTIOXIDANTE	1	1,56	1,56	0,12	0,730
IMPRIMANTE*ANTIOXIDANTE	1	5,06	5,06	0,40	0,537
Error	12	150,75	12,56		
Total	15	1697,94			

Model Summary

ADHERENCIA = 89,438 - 9,813 IMPRIMANTE + 0,312 ANTIOXIDANTE + 0,563 IMPRIMANTE*ANTIOXIDANTE

R-sq R-sq(adj)
91,12% 88,90%

DF=GRADOS DE LIBERTAD
SS=SUMA DE CUADRADOS
MS=CUADRADOS MEDIOS

Se puede ver que el modelo expresado en la ecuación de la ADHERENCIA y el factor Imprimante son significativos, pues tienen un P-Value < 0,05 (este experimento se realiza con un nivel de significancia $\alpha=5\%$). El factor Antioxidante y la combinación A*B no tienen efecto significativo en la salida. Sólo se rechaza la hipótesis nula para el Efecto A.

Para el análisis de los resultados del ANOVA se utilizan más la visualización de gráficos que la revisión de fórmulas y números. Por ejemplo, las significancias de los factores y sus combinaciones se pueden resaltar por medio de un Gráfico de Pareto:

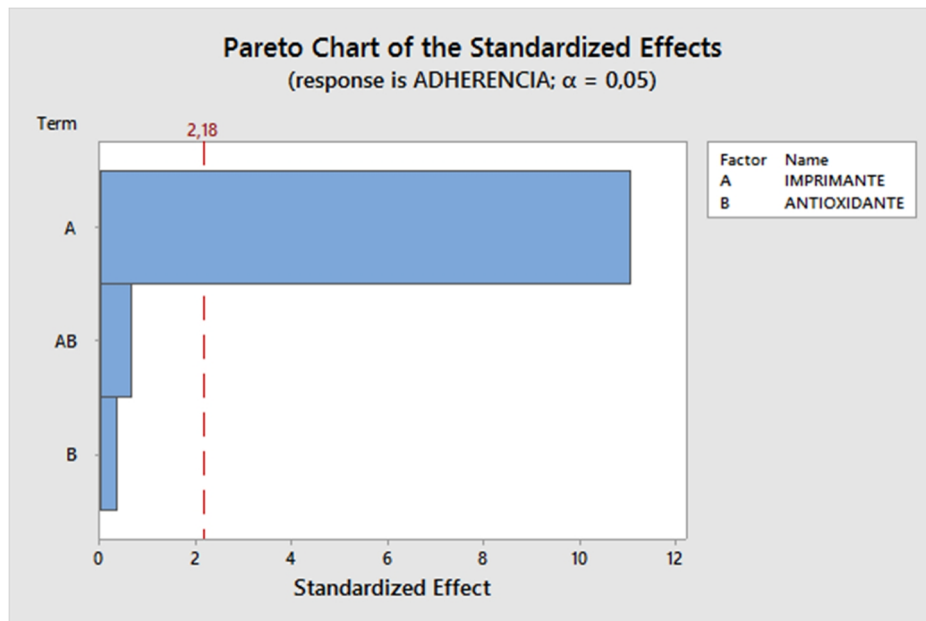


Figura 95: Pareto de significancias de Imprimante y Antioxidante
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDROR

La línea roja representa el nivel común sobre el cual los efectos son significativos. Se obtiene a través de la distribución t de Student. El límite del Pareto es $t(\alpha/2; GL_{error})$. Los grados de libertad del error son 12.

Otra forma de visualizar la significación es por medio de un gráfico normal de los efectos estandarizados. Los efectos significativos están lejos de la línea roja.

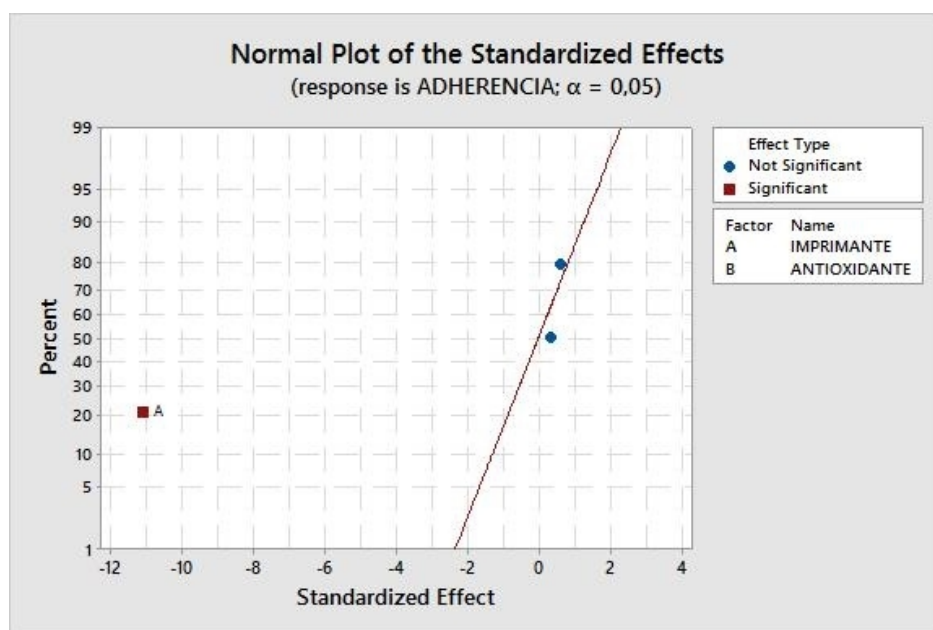


Figura 96: Gráfico normal de significancias de Imprimante y Antioxidante
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDROR

La ecuación de la ADHERENCIA, que es realmente un modelo de regresión que permite predecir las salidas del proceso, sirve para construir la Región Experimental, y es válida sólo dentro del área experimental:

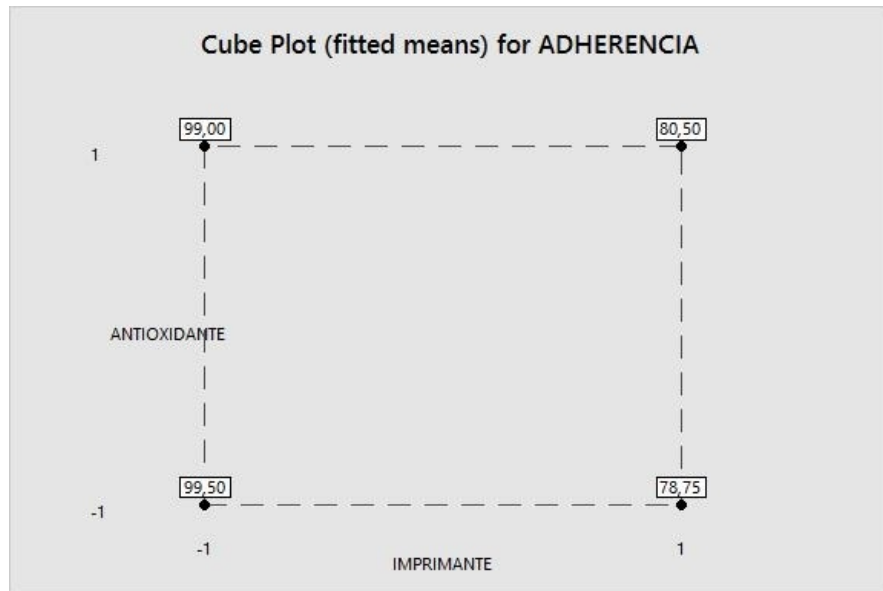


Figura 97: Región experimental bidimensional de la adherencia
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

De la región experimental bidimensional puede concluirse que el mejor tratamiento (que en este caso coincide con la solución óptima para el proceso) para alcanzar un nivel de ADHERENCIA del 99,50%, puede obtenerse si no se utilizan ni Imprimante ni Desoxidante en la preparación de la superficie metálica ferrosa. El peor resultado, naturalmente, se obtiene con el uso simultáneo de los dos químicos (78,75%).

Los resultados del MINITAB también incluyen el coeficiente de determinación R^2 (R-sq) y el coeficiente de determinación ajustado R^2_{aj} (R-sq adj). Sus valores son 91,12 % y 88,90%, respectivamente, indicando que el modelo obtenido es bueno, pues son valores mayores al 80%.

Finalmente, debe indicarse que el análisis ha resultado útil para fines prácticos de mejora del proceso de pintura analizado, pero los resultados obtenidos sólo son válidos si se verifican los supuestos del modelo.

NORMALIDAD

El Gráfico de Normalidad reportado por el MINITAB es el siguiente:

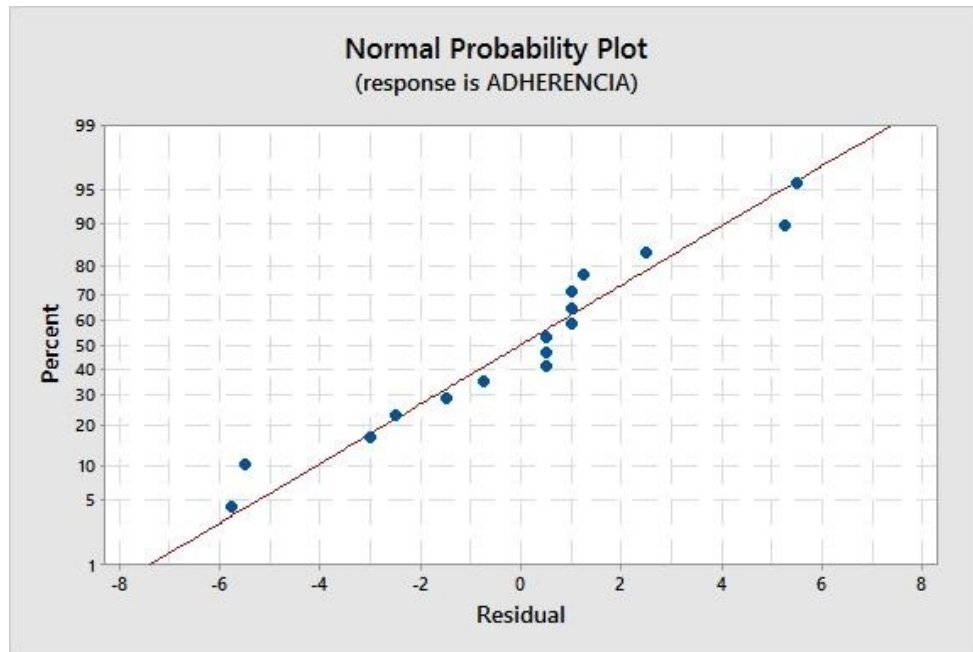


Figura 98: Verificación de supuesto de normalidad de residuos
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Por tanto, puede considerarse que la condición de normalidad se cumple

VARIANZA CONSTANTE

A veces puede haber dificultad en la interpretación de los gráficos de varianza constante. Por ejemplo cuando se trabaja con distribuciones asimétricas, que es el caso del proceso que se analiza, pues hay una asimetría a la derecha, debido a que no puede haber una adherencia mayor al 100%. Como el objetivo del proceso y de los esfuerzos por mejorarlo es alcanzar la máxima adherencia posible, los datos tienden a agruparse cerca del límite derecho, causando distorsiones en los gráficos de prueba.

En esos casos es conveniente mirar todos los gráficos, por predichos y por niveles de factor, e intentar una interpretación integral.

VARIANZA CONSTANTE

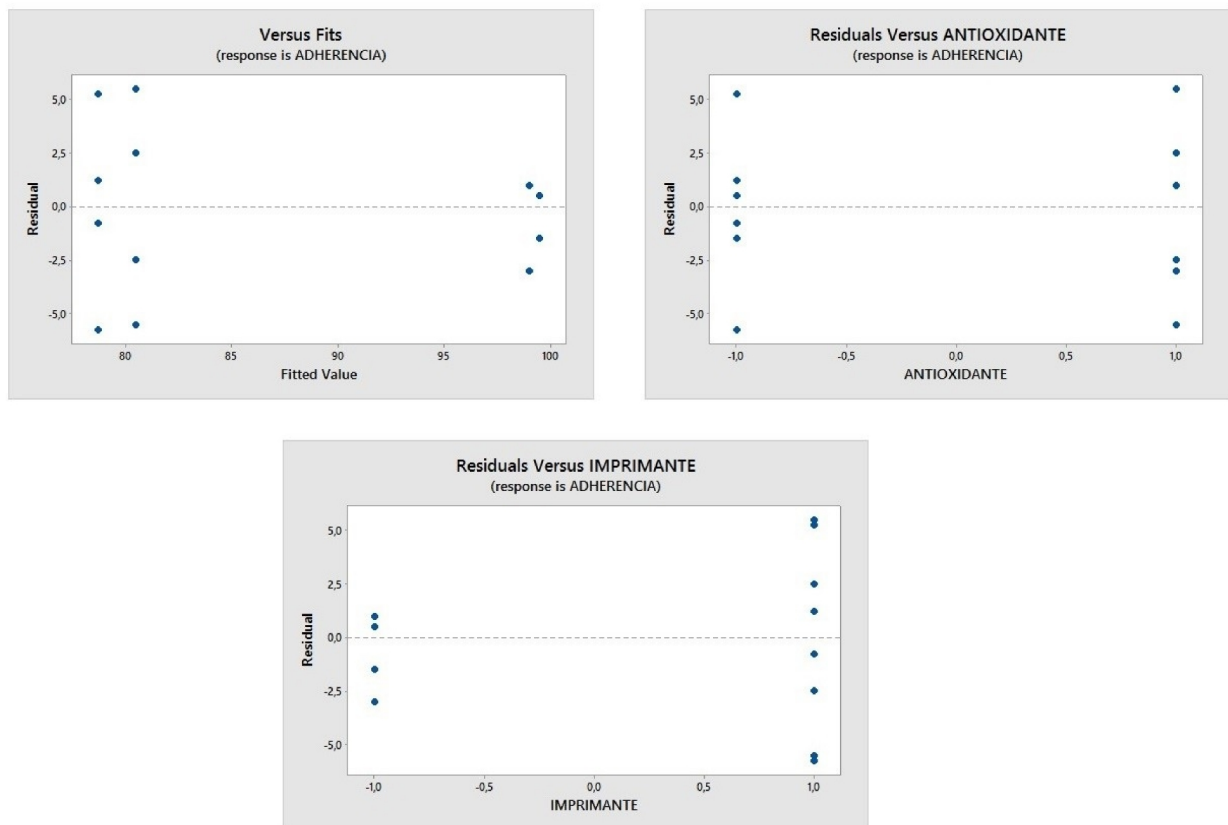


Figura 99: Verificación de supuesto de varianza constante

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Los Gráficos de Predichos contra Residuos y de Imprimante contra Residuos presentan una dispersión menor en el lado del mejor desempeño (en predichos, mientras más mejor; en Imprimantes, en ausencia mejor), y en ese caso se considera una elección correcta el aceptar los resultados del ANOVA, aunque dichos gráficos no cumplan estrictamente con las reglas para varianza constante aceptadas generalmente. Si es que el lado que se considera el mejor fuera el que tiene la varianza más grande (o si es que la menor dispersión de puntos está en el lado no óptimo), entonces la decisión de aceptar los resultados del ANOVA sería incorrecta.

INDEPENDENCIA

El gráfico de independencia entregado por el MINITAB indica que se ha procedido con la suficiente aleatoriedad en la corrida de los tratamientos, como se ve a continuación.

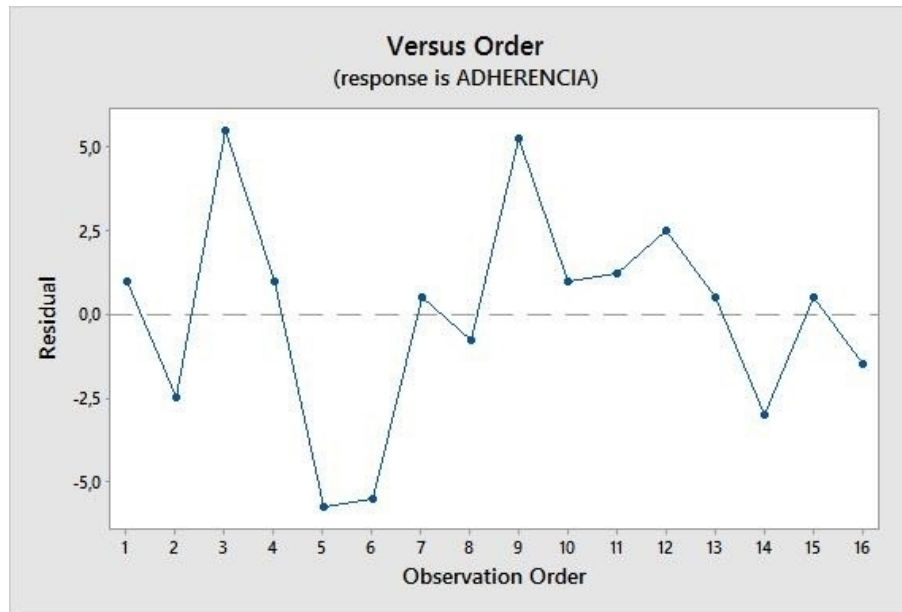


Figura 100: Verificación de supuesto de independencia

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

DISEÑO FACTORIAL 2^K PARA PINTURAS HORNEABLES

En el caso de las pinturas horneables, se debe probar la significación de efecto en la ADHERENCIA de: (A) el tiempo desde preparación de la superficie a pintar; (B) la temperatura del horno; y (C) el tipo de pintura, líquida o en polvo. Por supuesto también debe comprobarse la significación de las combinaciones de estos factores ($A*B$, $A*C$, $B*C$, $A*B*C$).

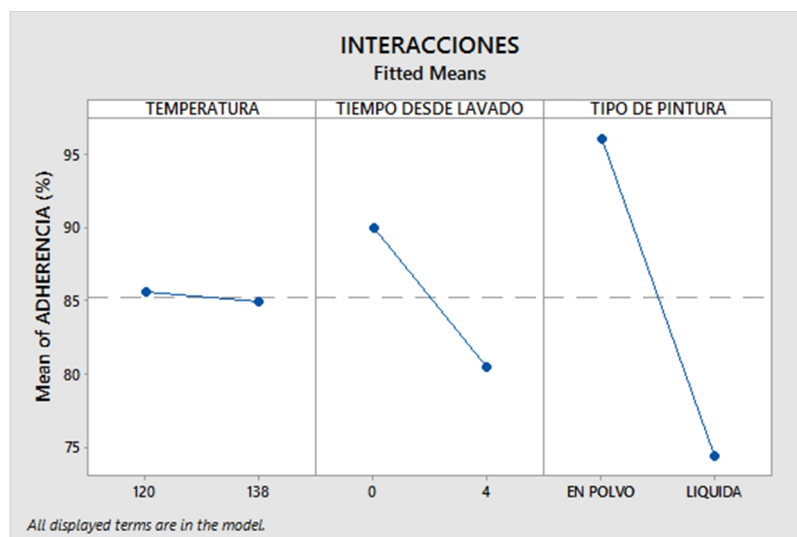
Desde el MINITAB mismo se pueden obtener los tratamientos (combinaciones de los factores, o estándares), y el orden aleatorio en que esos tratamientos deben ser experimentados en el campo. En este caso se trata de $2^3 = 8$ tratamientos. Para las pruebas se realizaron dos repeticiones y, para enriquecer la información, se introdujeron 4 puntos centrales. En total, se debieron realizar 20 mediciones. Debe recordarse la siguiente simbología: Para TIEMPO DE PREPARACIÓN, -1 es 0 horas y +1 es 4 horas; para TEMPERATURA DEL HORNO, -1 es 120°C y +1 es 138°C ; para TIPO DE PINTURA, -1 es pintura líquida, +1 es pintura en polvo. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 35:**Datos de adherencia. Pinturas horneables. Proceso sin mejora.**

ORDEN ESTÁNDAR	ORDEN DE CORRIDA	PUNTOS CENTRALES	TEMPERATURA	TIEMPO DESDE LAVADO	TIPO DE PINTURA	ADHERENCIA (%)
14	1	1	1	-1	1	100
2	2	1	1	-1	-1	87,5
19	3	0	0	0	-1	85,12
9	4	1	-1	-1	-1	77,98
13	5	1	-1	-1	1	94,64
4	6	1	1	1	-1	55,95
7	7	1	-1	1	1	91,67
15	8	1	-1	1	1	93,45
16	9	1	1	1	1	97,02
20	10	0	0	0	1	97,62
11	11	1	-1	1	-1	76,19
18	12	0	0	0	1	96,43
8	13	1	1	1	1	97,62
12	14	1	1	1	-1	53,57
3	15	1	-1	1	-1	75,6
17	16	0	0	0	-1	67,86
5	17	1	-1	-1	1	94,05
1	18	1	-1	-1	-1	77,98
6	19	1	1	-1	1	98,81
10	20	1	1	-1	-1	85,71

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Procesando en el MINITAB los datos obtenidos, se obtuvieron los siguientes resultados:

INTERACCIÓN**Figura 101: Interacciones principales temperatura, tiempo, tipo**

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

En el gráfico de Interacciones Principales se puede ver claramente que el NIVEL DE ADHERENCIA está directamente relacionado con el tipo de pintura y con el tiempo que transcurre desde la preparación de la superficie hasta que ésta se pinta. En este último caso, no importa si se trata de pintura líquida o de pintura en polvo, pues siempre el tiempo desde el lavado parece ser significativo. Respecto de la temperatura del horno, pasados los 120°C, parecería que no hay significación, pero como es un resultado global para los dos tipos de pintura, puede ser que estén incidiendo en ese resultado efectos que en realidad son diferentes cuando se trata de pinturas diferentes. Para resolver esa duda, se deben analizar los gráficos de interacción con los factores interactuando de dos en dos.

Mirando el gráfico que tiene “TIEMPO DESDE” en el eje X, se puede concluir que en efecto siempre este factor incide negativamente en la adherencia mientras más grande es, pero el efecto pernicioso es mayor tratándose de pintura líquida. Cuando se aplica pintura en polvo, también se debe cuidar que se pinte la pieza en cuanto se la prepara, si se quiere alcanzar los mejores niveles de adherencia posibles.

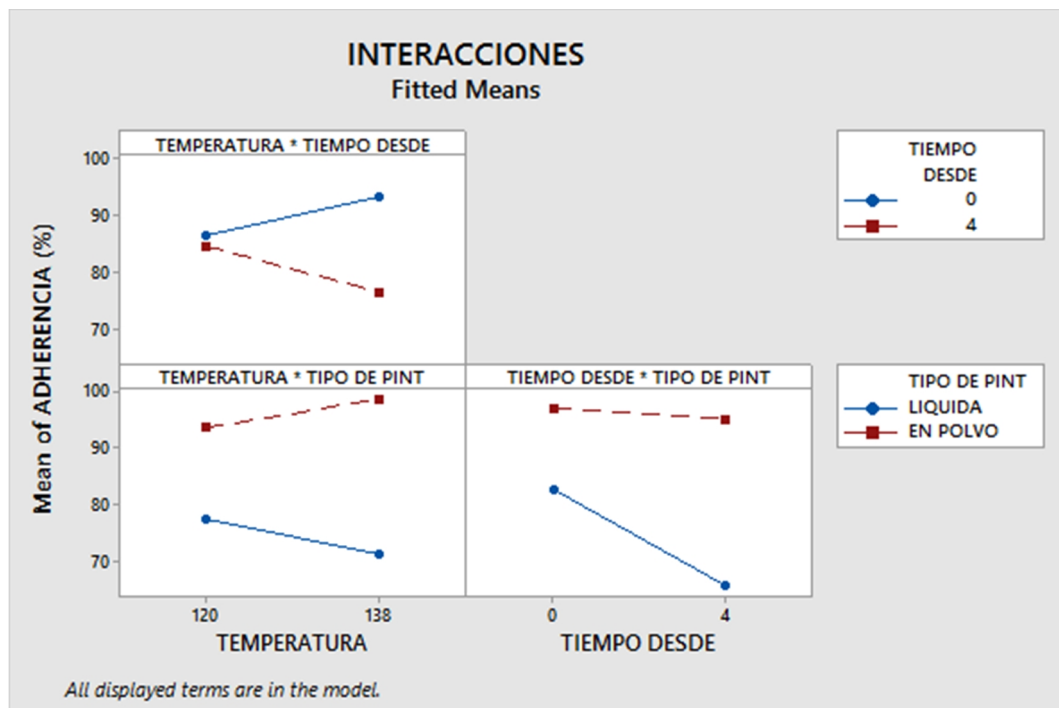


Figura 102: Interacciones de tres factores
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Si se trata de analizar los gráficos con la TEMPERATURA en el eje X, primero con la interacción TEMPERATURA x TIPO DE PINTURA, se puede ver que el incremento de temperatura del horno es definitivamente beneficioso en el caso de la pintura en polvo (se comprobó que, en la práctica, esto sucede hasta un nivel de aproximadamente 150°C, a partir del cual la pintura empieza a quemarse). En el caso de la pintura líquida, parecería que el aumento de temperatura disminuye la adherencia, pero hay que tener presente que en los gráficos no está presente la interrelación AxBxC, que puede llegar a ser muy significativa. Por eso, es importante realizar el análisis ANOVA para poder arribar a conclusiones definitivas.

En cuanto a la última interacción, que tiene la TEMPERATURA en el eje X, ahora con la interacción TEMPERATURA x TIEMPO DESDE, se confirma que (al menos para la pintura en polvo) la ADHERENCIA sube con la temperatura cuando la pieza se pinta inmediatamente después de ser preparada. El sólo transcurso de 4 horas perjudica la adherencia en los dos tipos de pintura.

Debe mencionarse que la gran diferencia de niveles de adherencia promedio entre los dos tipos de pintura (aprox. 78 % para la líquida y aprox. 96% para la electrostática) ha precipitado la decisión de eliminar la pintura líquida de secamiento al ambiente de entre las opciones ofrecidas al cliente. Más adelante se demuestra que sería posible llegar hasta una adherencia de como el 87%, pero aun así se trata de un nivel de calidad insuficiente para cumplir con las especificaciones de los clientes en ese tipo de pintura.

Es importante ejecutar el análisis de varianza, ANOVA, en este caso también en el MINITAB. Como siempre, esta prueba de hipótesis utiliza el estadístico F_0 que sigue una distribución F cuando la hipótesis nula es cierta. Las hipótesis nulas y alternativas son:

H_0 : Efecto A = 0; H_0 : Efecto B = 0; H_0 : Efecto C = 0; H_0 : Efecto AB = 0;
 H_0 : Efecto AC = 0; H_0 : Efecto BC = 0; H_0 : Efecto ABC = 0

H_A : Efecto A \neq 0; H_A : Efecto B \neq 0; H_A : Efecto C \neq 0; H_A : Efecto AB \neq 0;
 H_A : Efecto AC \neq 0; H_A : Efecto BC \neq 0; H_A : Efecto ABC \neq 0

Los resultados del análisis ANOVA realizado por el MINITAB se ven más abajo. El MINITAB reporta por default el mejor ANOVA posible. En el resumen de los valores p (que deben ser menores a 0,05 para ser significativos, pues se trabaja con $\alpha = 0,05$) se aprecia que el modelo matemático obtenido y su linealidad son significativos. La curvatura y la falta de ajuste no son significativos. En otras palabras, el modelo lineal obtenido es válido. En cuanto a los factores, todos ellos y sus combinaciones son significativos, con excepción aparentemente de la temperatura. Pero no es que la temperatura no sea significativa, si no que expresa su efecto sobre la salida del proceso cuando se combina con los otros dos factores (tipo de pintura y tiempo desde el lavado), como se vio en el análisis de los gráficos de interacción.

En cuanto a las ecuaciones que permiten predecir la adherencia dentro del cubo de los valores experimentales, ellas presentan buenos valores de determinación (mayores a 0,8) por lo que se las puede considerar válidas. El gráfico en cubo permite ver las mejores combinaciones para los valores de prueba utilizados en los experimentos:

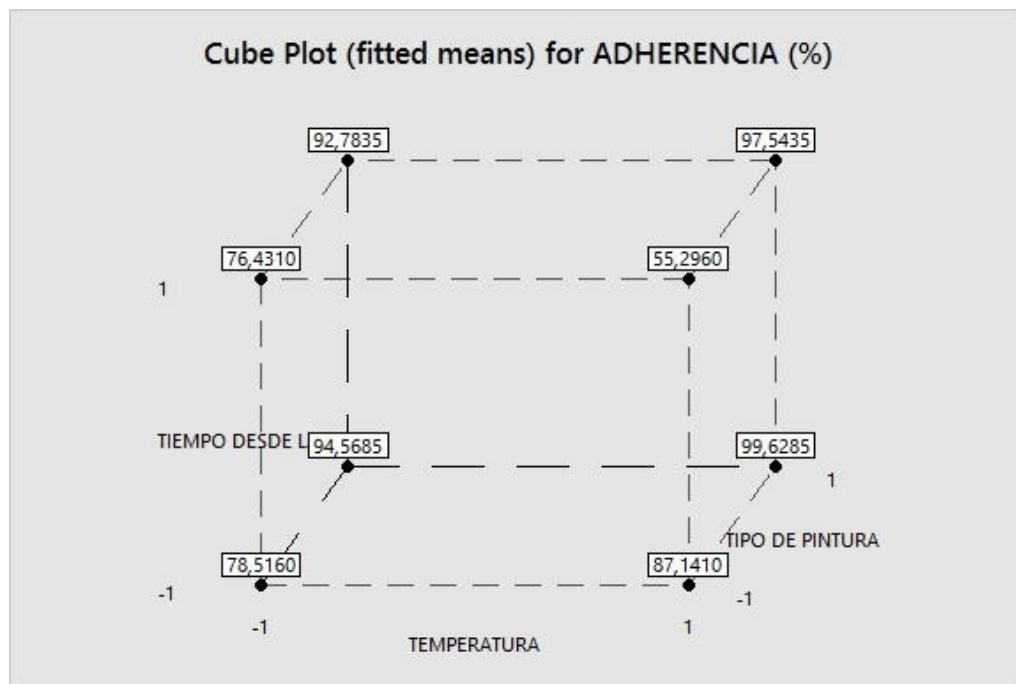


Figura 103: Región experimental tridimensional de la adherencia
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Con los parámetros experimentales, la mejor adherencia posible (99,63%) se obtiene con la pintura en polvo, una temperatura de 138°C y cero horas entre lavado de la superficie y la aplicación de pintura.

Factorial Regression: ADHERENCIA (versus TEMPERATURA; TIEMPO DESDE; TIPO DE PINT; CenterPt

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	3536,92	442,11	30,61	0,000
Linear	3	2731,95	910,65	63,05	0,000
TEMPERATURA	1	1,81	1,81	0,13	0,730
TIEMPO DESDE LAVADO	1	357,21	357,21	24,73	0,000
TIPO DE PINTURA	1	2372,93	2372,93	164,30	0,000
2-Way Interactions	3	576,46	192,15	13,30	0,001
TEMPERATURA*TIEMPO DESDE LAVADO	1	225,90	225,90	15,64	0,002
TEMPERATURA*TIPO DE PINTURA	1	124,66	124,66	8,63	0,013
TIEMPO DESDE LAVADO*TIPO DE PINTURA	1	225,90	225,90	15,64	0,002
3-Way Interactions	1	216,97	216,97	15,02	0,003
TEMPERATURA*TIEMPO DESDE LAVADO*TIPO DE PINTURA	1	216,97	216,97	15,02	0,003
Curvature	1	11,54	11,54	0,80	0,391
Error	11	158,87	14,44		
Lack-of-Fit	1	1,95	1,95	0,12	0,732
Pure Error	10	156,92	15,69		
Total	19	3695,79			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
3,80035	95,70%	92,58%	90,86%

Regression Equation in Uncoded Units

$$\begin{aligned} \text{ADHERENCIA (\%)} = & 84,859 - 0,336 \text{ TEMPERATURA} - 4,725 \text{ TIEMPO DESDE LAVADO} \\ & + 10,893 \text{ TIPO DE PINTURA} - 3,757 \text{ TEMPERATURA*TIEMPO DESDE LAVADO} \\ & + 2,791 \text{ TEMPERATURA*TIPO DE PINTURA} \\ & + 3,758 \text{ TIEMPO DESDE LAVADO*TIPO DE PINTURA} \\ & + 3,682 \text{ TEMPERATURA*TIEMPO DESDE LAVADO*TIPO DE PINTURA} + 1,90 \text{ Ct Pt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ADHERENCIA (\%)} = & 40,9 + 0,380 \text{ TEMPERATURA} + 24,57 \text{ TIEMPO DESDE LAVADO} + 19,9 \text{ TIPO DE PINTURA} \\ & - 0,2087 \text{ TEMPERATURA*TIEMPO DESDE LAVADO} - 0,099 \text{ TEMPERATURA*TIPO DE PINTURA} \\ & - 24,51 \text{ TIEMPO DESDE LAVADO*TIPO DE PINTURA} \\ & + 0,2046 \text{ TEMPERATURA*TIEMPO DESDE LAVADO*TIPO DE PINTURA} \end{aligned}$$

DF = GRADOS DE LIBERTAD

Adj SS = SUMA DE CUADRADOS AJUSTADOS

Adj MS = CUADRADOS MEDIOS AJUSTADOS

Los valores del cubo se pueden obtener a partir de la primera de las dos ecuaciones que proporciona el MINITAB, trabajando con los valores -1 y +1 de los factores. Para el valor del punto central que requiere la ecuación, se debe considerar el porcentaje que representan los datos correspondientes a los puntos centrales en relación al número total de corridas realizadas (en esta caso, 4 / 20, es decir 0,2). Los puntos de la región experimental tridimensional se los puede predecir también con la segunda de las ecuaciones del MINITAB, pero usando los valores absolutos (0°C y 138°C para la temperatura, 0 y 4 horas para el tiempo desde lavado y el valor

codificado -1 y +1 para la pintura). Nuevamente, los resultados predichos son sólo válidos dentro del área experimental.

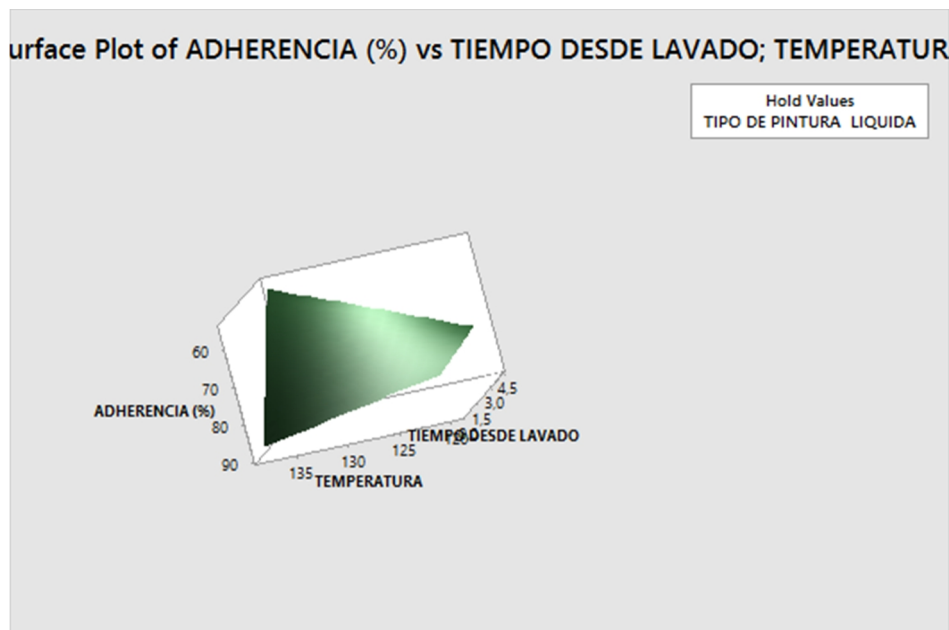


Figura 104: Cubo de porcentajes de adherencia para pintura líquida horneable
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Con la pintura líquida de secamiento al horno se puede llegar a una adherencia máxima del 87,14 % trabajando con 138°C de temperatura y 0 horas después del lavado. Con la pintura electrostática se puede alcanzar una máxima adherencia del 99,63%, bajo las mismas condiciones. Los dos puntos de máxima adherencia son los mejores tratamientos para cada uno de los dos tipos de pintura, pero eso no significa que se haya llegado a determinar el “punto óptimo” de adherencia para el proceso estudiado, punto que seguramente se encuentra fuera de la región experimental. Es decir, si bien las ecuaciones de regresión no sirven por fuera del área cúbica experimental, eso no significa que no pueda haber otros puntos de mejor desempeño, dentro de un cubo más grande que se conoce como la “Región de Operabilidad”. La forma de encontrarlos implica el uso de técnicas más avanzadas, como la “Metodología de Superficie de Respuesta”, que exige la realización de más experimentos en secuencia hasta “atrapar” al verdadero punto óptimo.

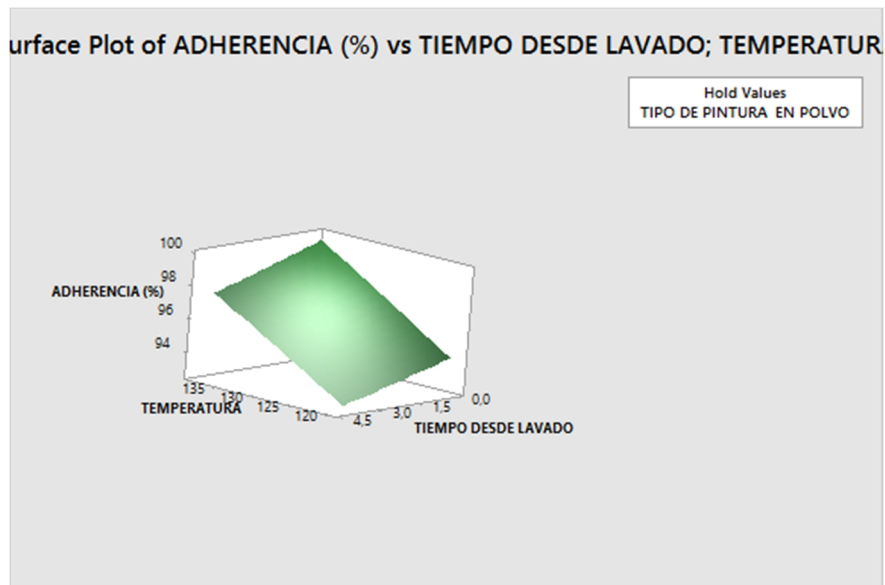


Figura 105: Cubo de porcetajes de adherencia para pintura electrostática
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDROR

Sin embargo, cabe preguntarse si es que subir más allá del 99,63% hallado a partir de la región cúbica experimental vale la pena versus el costo de más experimentos y análisis. Teniendo presente, además, el nivel de incertidumbre del 5% que en general se especifica para este tipo de experimentos. Definitivamente, un 0,0037% de mejora adicional parecería no tener sustento en cuanto a invertir un mayor esfuerzo económico y humano. Debe recordarse, finalmente, que los niveles de prueba especificados a-priori para los factores provienen siempre de un conocimiento muy valedero de quienes son expertos en el proceso, es decir de los operadores del mismo. Por esa razón, suele ocurrir que el “mejor tratamiento” está bien cerca del “punto óptimo”. Sólo en casos en que sea muy importante subir el desempeño del proceso a toda costa se justifica la búsqueda del llamado “punto óptimo”. El asunto a enfrentar realmente es estabilizar el proceso centrándolo, si es posible, respecto de las especificaciones (que está en el $97\% \pm 2$ para la pintura electrostática) y limitando su variación hacia una campana de dispersión más estrecha.

NORMALIDAD

El Gráfico de Normalidad para los datos de salida del proceso, reportado por el MINITAB es el siguiente:

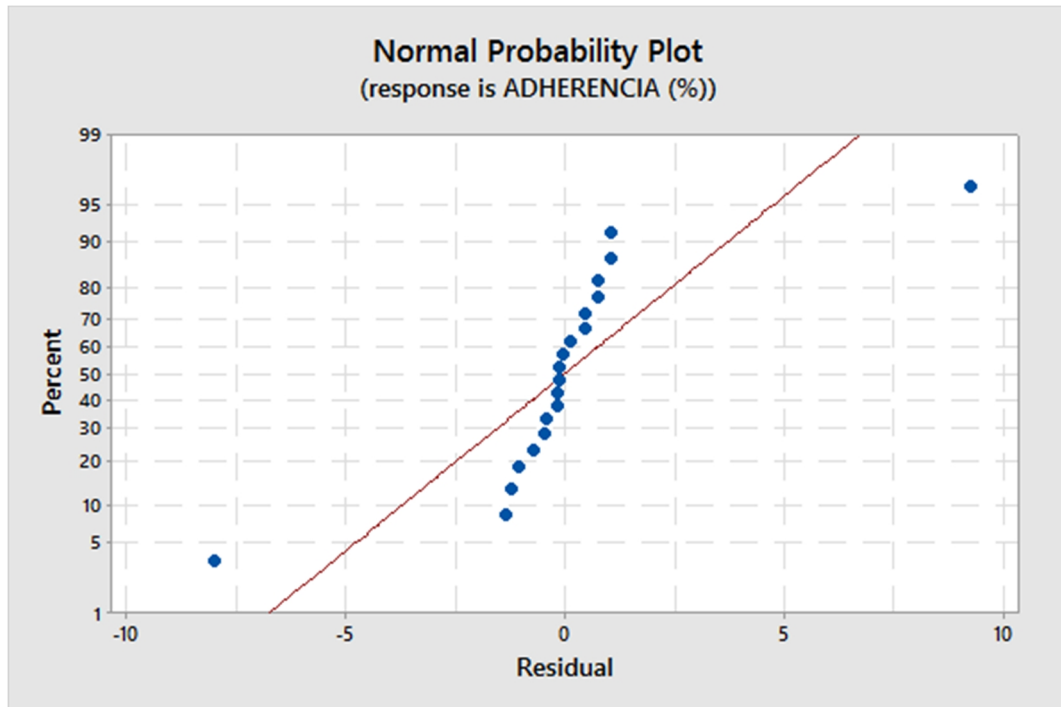


Figura 106: Verificación del supuesto de normalidad de residuos
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Aunque los residuos no siguen exactamente una distribución normal, debe considerarse que este es un proceso con un histograma intrínsecamente asimétrico hacia la derecha. La normalidad no es el supuesto más estricto, y es útil revisar la normalidad de los datos de salida del proceso.

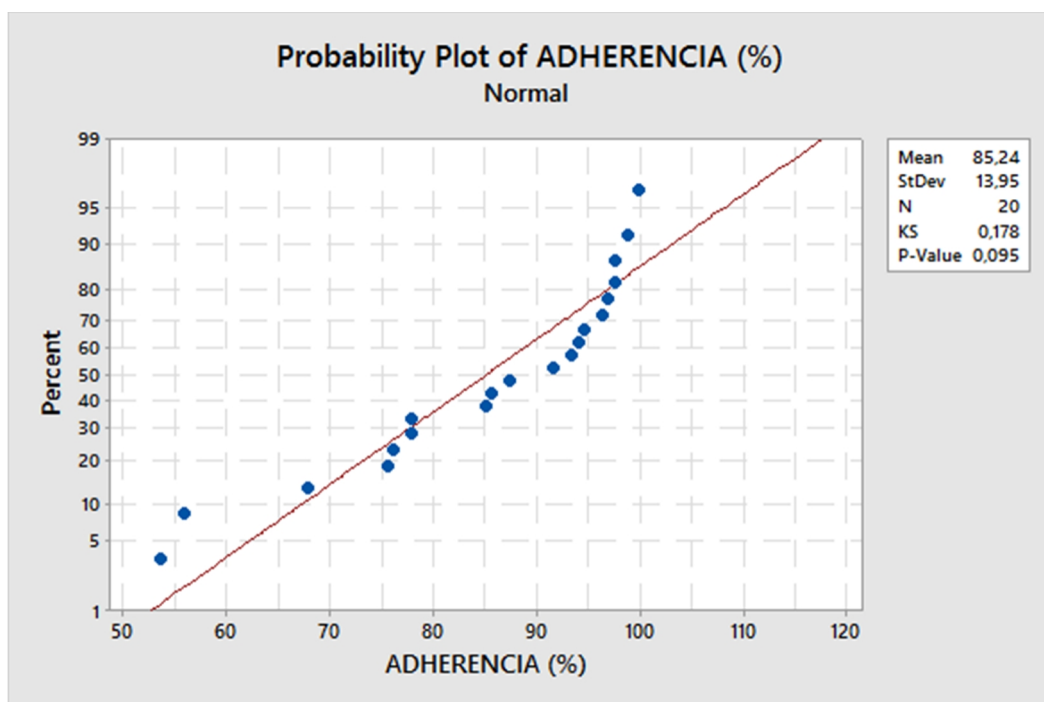


Figura 107: Normalidad de las salidas del proceso
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El Valor-p es mayor que 0,05. Además, debe considerarse que se están experimentando, juntas, dos tipos de pintura que tienen comportamientos distintos, pero los dos siguiendo su respectiva distribución normal.

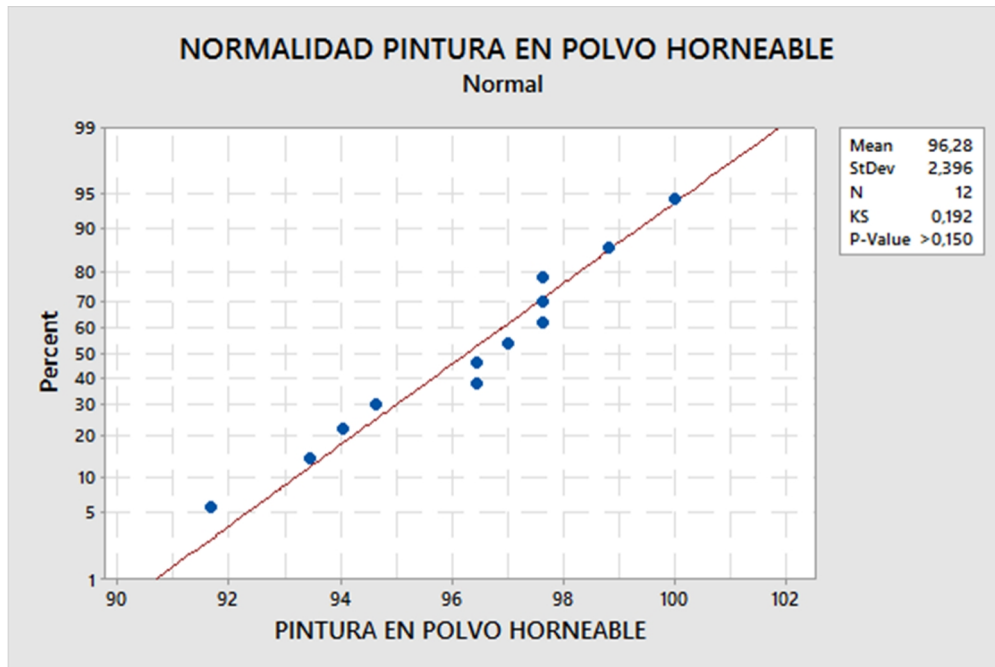


Figura 108: Normalidad de salidas pintura electrostática
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

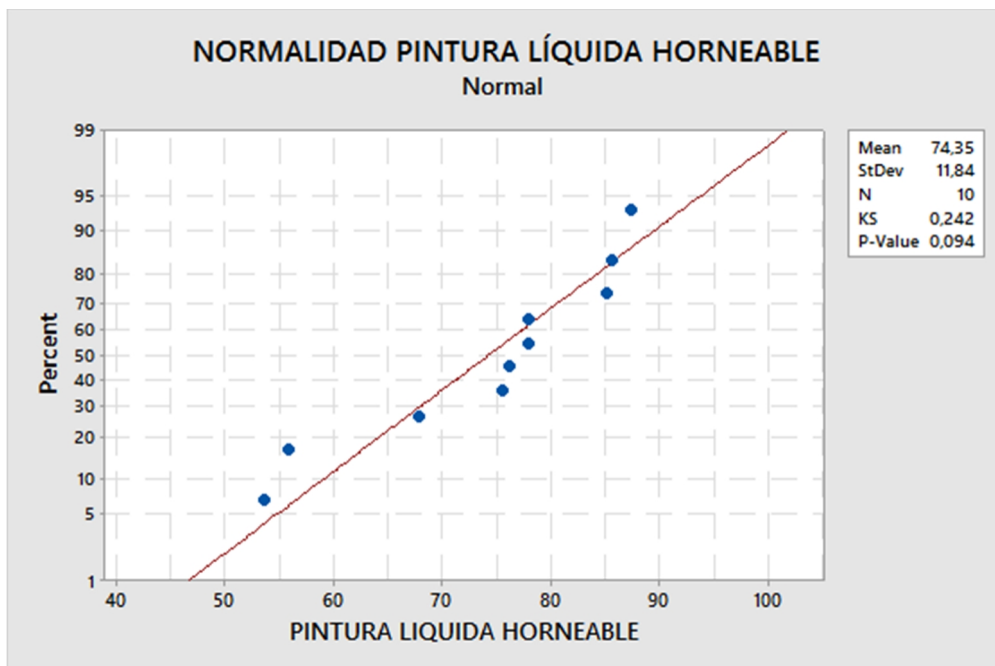


Figura 109: Normalidad de salidas pintura líquida horneable
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Se considera que la condición de normalidad se cumple.

VARIANZA CONSTANTE

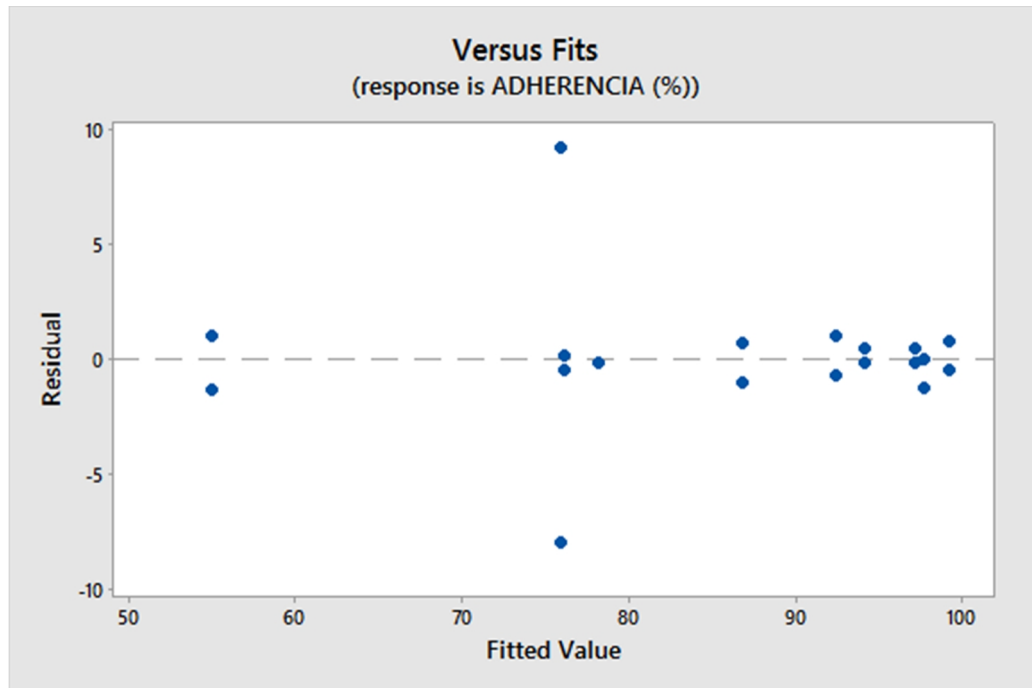


Figura 110: Verificación de supuesto de varianza constante. Predichos-Residuos
ELABORADO POR: BOLÍVAR

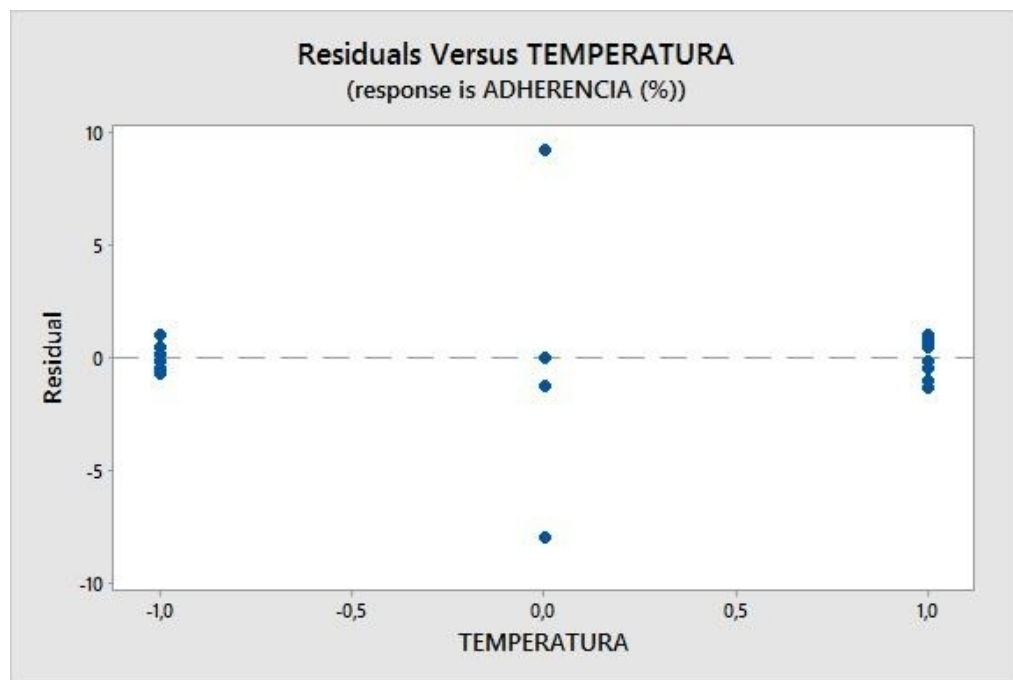


Figura 111: Verificación de supuesto de varianza constante. Temperatura-Residuos.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

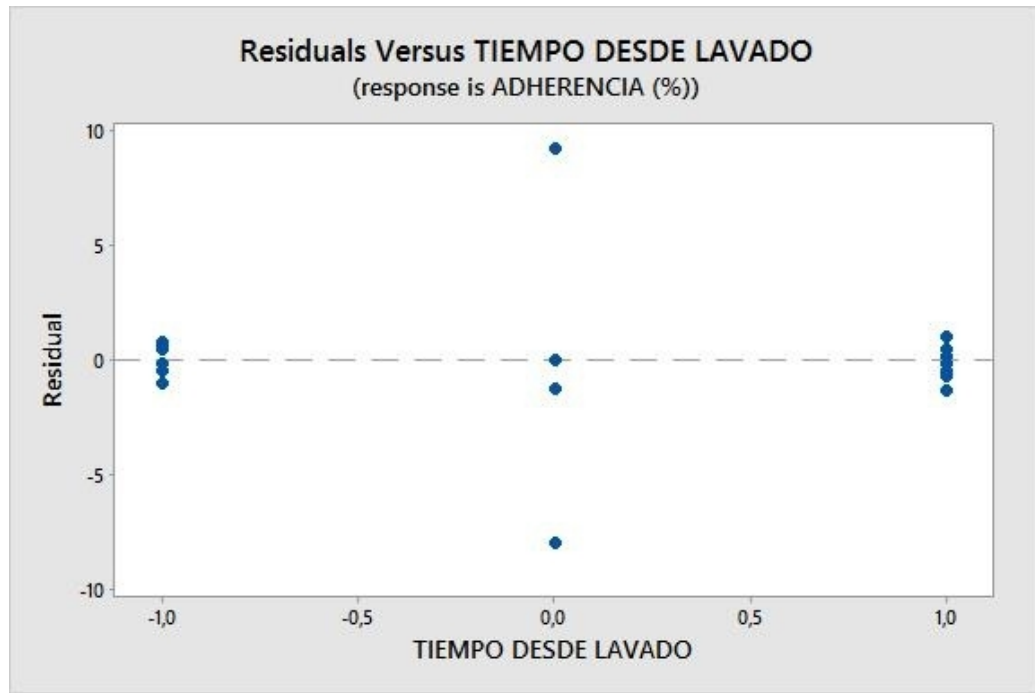


Figura 112: Verificación de supuesto de varianza constante. Tiempo-Residuos
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

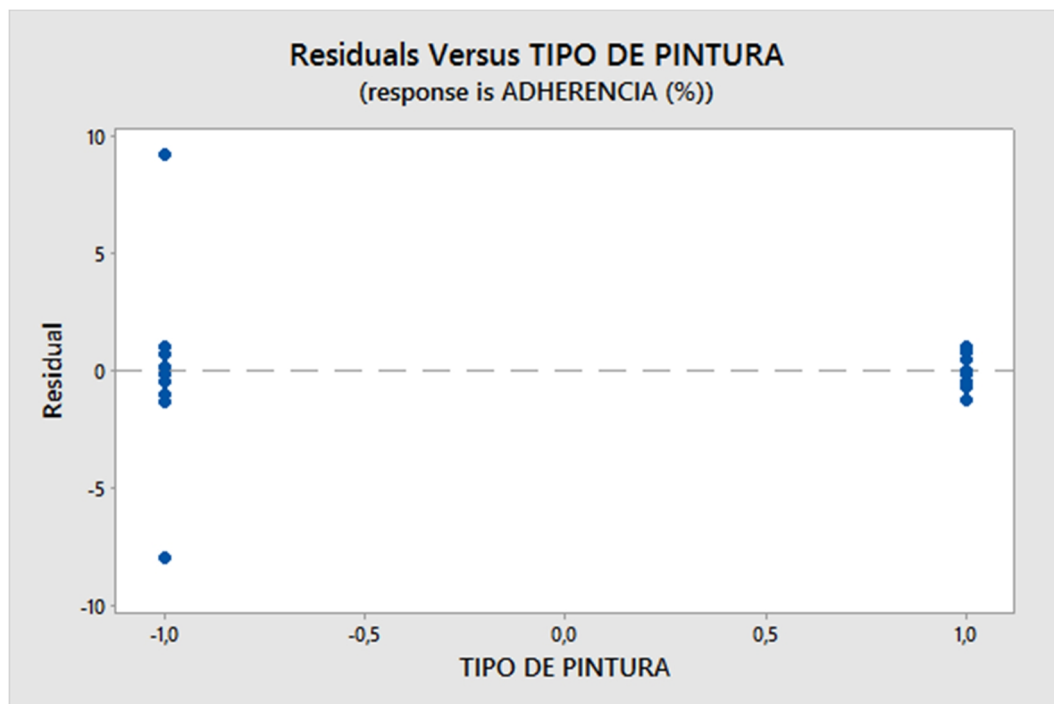


Figura 113: Verificación de supuesto de varianza constante. Tipo-Residuos.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

El Gráfico de Predichos contra Residuos no presenta los puntos distribuidos en forma de embudo, y están más bien uniformemente distribuidos en una banda, excepto los residuos correspondientes a los puntos centrales. En el caso de estos puntos, lo importante es que no estén evidentemente concentrados por encima o por debajo de la línea media, pues eso indicaría que existe curvatura. Y en los Gráficos de Residuos contra factores, dejando de lado los residuos correspondientes a los puntos centrales, puede verse que los que tienen en el eje X la Temperatura y el Tiempo desde Lavado presentan una igual dispersión en los dos extremos del gráfico, lo cual es indicativo de varianza constante. No pasa lo mismo con el gráfico que tiene en el eje X el Tipo de Pintura, pero como la menor dispersión se encuentra en el extremo de mejor desempeño del proceso (+1, que significa pintura electrostática), se considera que el análisis ANOVA es válido. Una mayor concentración de puntos en el lado de peor desempeño implicaría rechazar el ANOVA realizado.

INDEPENDENCIA

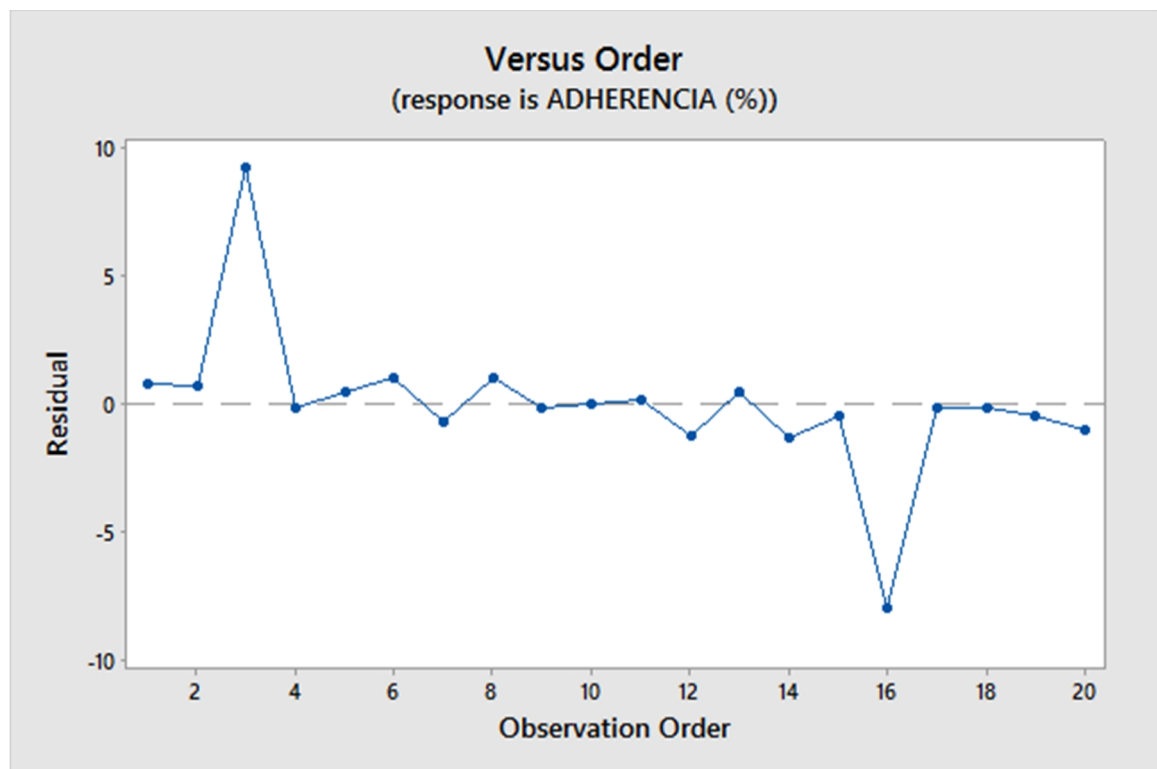


Figura 114: Verificación de supuesto de independencia de residuos
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Existen dos puntos que se alejan de manera poco usual de la línea media, correspondientes seguramente a los anormalmente bajos niveles de adherencia de pintura líquida horneable en dos de los experimentos realizados, pero en general se ve que existe aleatoriedad. Cuando se tienen más de 15 puntos consecutivos muy cercanos a la línea central, sea arriba y/o abajo, se puede presumir falta de variabilidad y presencia de una causa especial, lo que afectaría la aleatoriedad de las corridas. Por ejemplo, selección sesgada de los datos o muestra con datos provenientes de universos con medias bastante diferentes (que podría ser nuestro caso), pero en este caso no se llega a esa cantidad. Respecto de los últimos tres puntos, que insinuarían una tendencia, la norma indica que se necesitan seis o más puntos consecutivos en ascenso o descenso, y por ese motivo resultan insuficientes para confirmar falta de independencia.

CONTROLAR

Una vez realizado el análisis de varianza, y conocidos los efectos y sus combinaciones que son significativos, así como el modelo matemático que predice las salidas, y determinado también el mejor de los tratamientos, se debe proceder a implementar las recomendaciones extraídas y a procurar mantenerlas en el tiempo. Estamos en la etapa de **Control**. Para controlar el logro y perfeccionamiento de tales objetivos, la herramienta idónea son otra vez las Cartas de Control.

CONTROL DEL PROCESO DE PINTURA MARTILLADA DE SECAMIENTO AL AMBIENTE

En lo que se refiere a las pinturas líquidas de secamiento al ambiente, la conclusión más importante extraída del ciclo DMAIC hasta este punto es que en la preparación de la superficie a pintar no se debe utilizar ni Imprimante ni Antioxidante. Sólo debe utilizarse el desoxidante DESOXICONDOR, u otro de características similares, que ha sido probado desde hace bastante tiempo en la empresa.

En el caso de la LACA MARTILLADA DE SECAMIENTO AL HORNO, se procedió a extraer de la producción 9 subgrupos racionales de tamaño $n=3$. Los resultados de la medición del porcentaje de adherencia fueron:

Tabla 37:

Datos de adherencia. Lacas martilladas. Proceso mejorado.

MEDICION	SUBGRUPO 1	SUBGRUPO 2	SUBGRUPO 3	SUBGRUPO 4	SUBGRUPO 5	SUBGRUPO 6	SUBGRUPO 7	SUBGRUPO 8	SUBGRUPO 9
1	91,2	94,1	95,4	93,4	94,1	89,2	94,8	96,1	94,1
2	94,1	98,0	94,8	96,8	96,1	92,8	91,5	95,4	97,4
3	88,2	96,1	96,8	91,5	96,1	95,4	95,4	87,3	90,2

Tamaño Subgrupo Racional (n) = 3

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Aplicando los datos al MINITAB, los resultados fueron:

NORMALIDAD

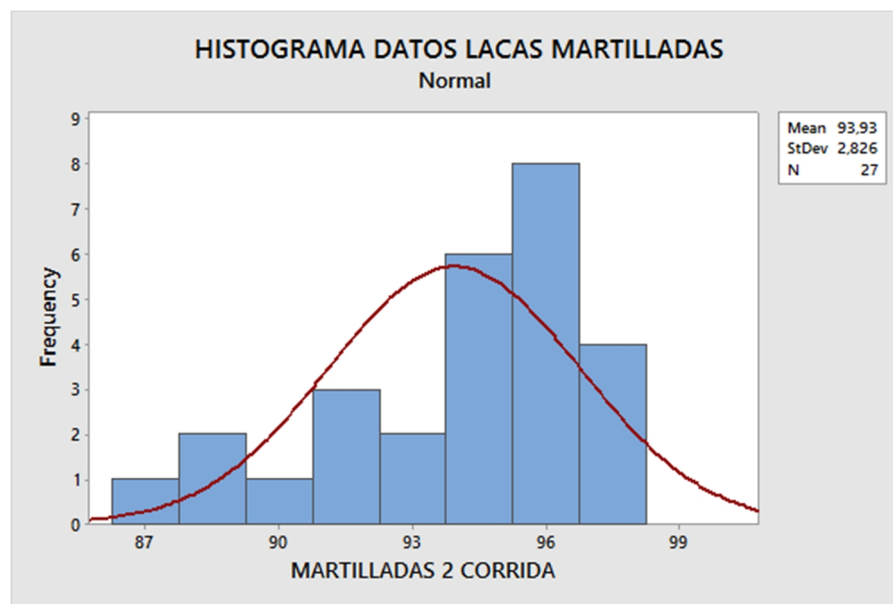


Figura 115: Histograma de proceso mejorado. Lacas martilladas.

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Sin el uso de los químicos Imprimante y Antioxidante, el desempeño del proceso mejoró, aunque la media de las medias bajó un poco (de 94,72% a 93,93). Hay menor dispersión de los datos (la desviación estándar bajó de 8,58 a 2,83), y el proceso se consolidó como un proceso normal, dentro de lo posible porque la adherencia siempre dará un histograma asimétrico hacia la derecha, pues todo el trabajo que se realice orientado hacia la mejora del proceso de pintura tratará de llevar la adherencia hacia su máximo posible, que es el 100%. Mientras mejor sea el proceso, más

aumentará su asimetría derecha. Cuando se trata de mejorar cualquier proceso hacia el 100%, no se puede esperar una normalidad perfecta.

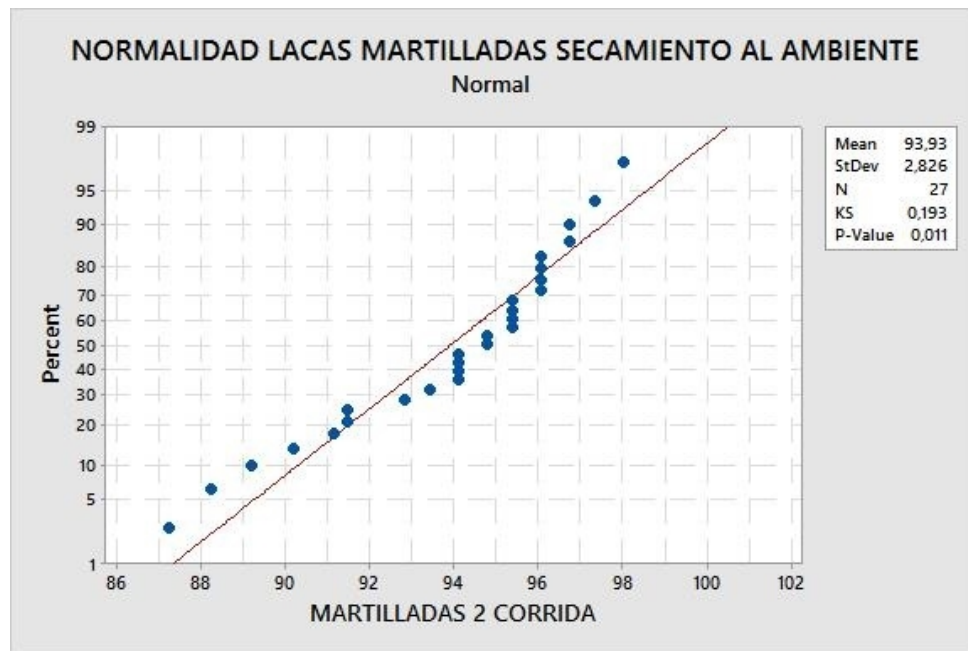


Figura 116: Normalidad de proceso mejorado. Lacas martilladas.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

CONTROL ESTADÍSTICO

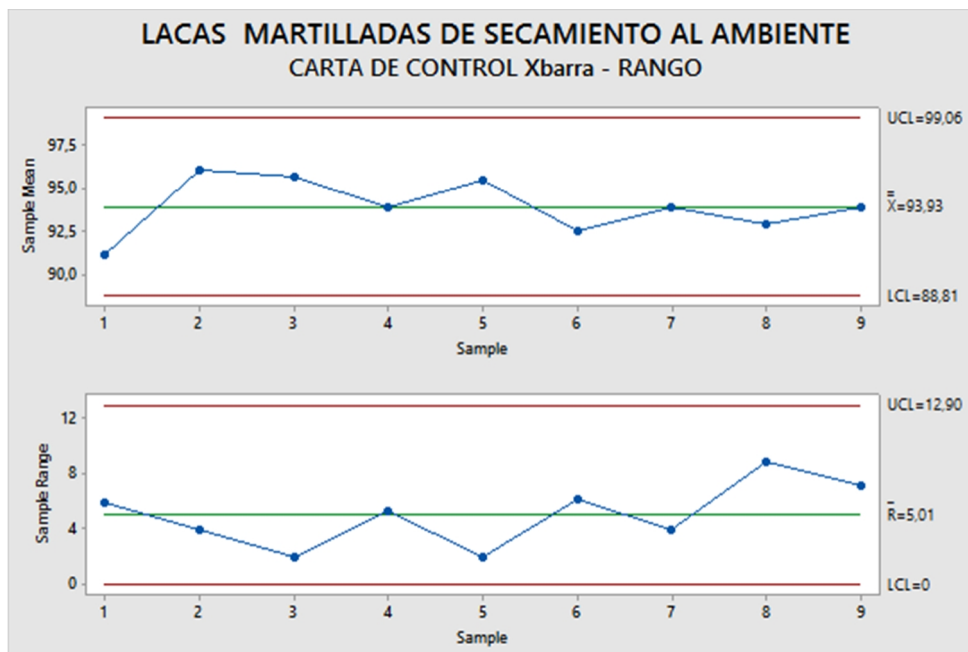


Figura 117: Cartas \bar{X} - R de proceso mejorado. Lacas martilladas.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

CAPACIDAD

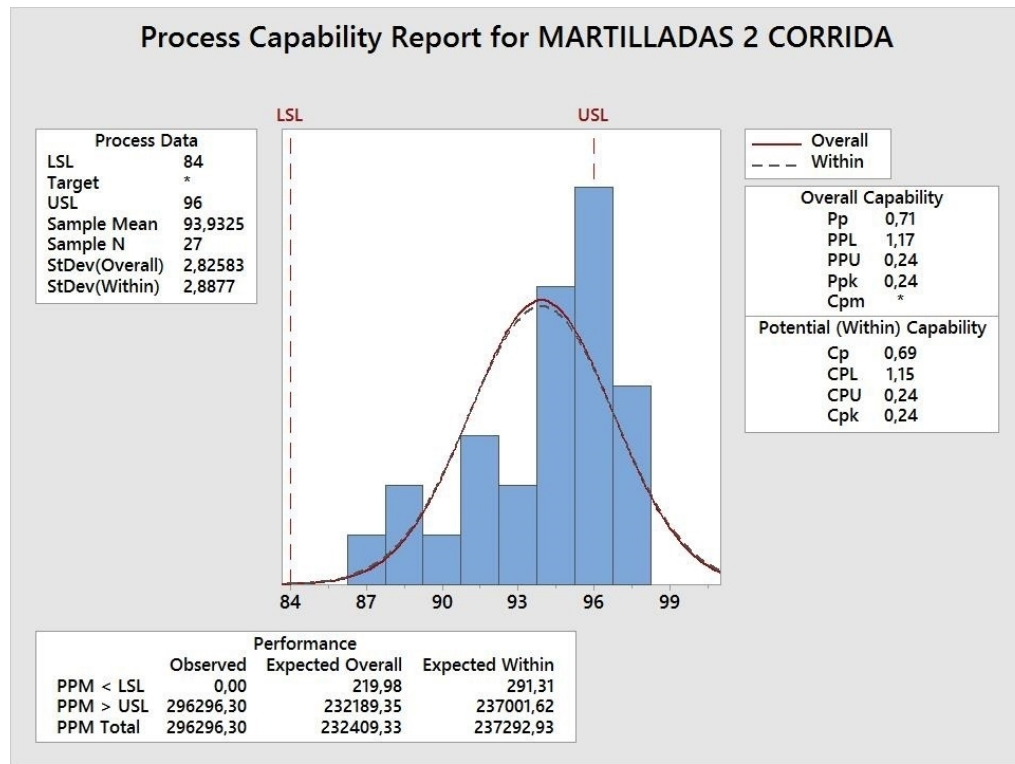


Figura 118: Capacidad de proceso mejorado. Lacas martilladas. Sin Box-Cox.

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

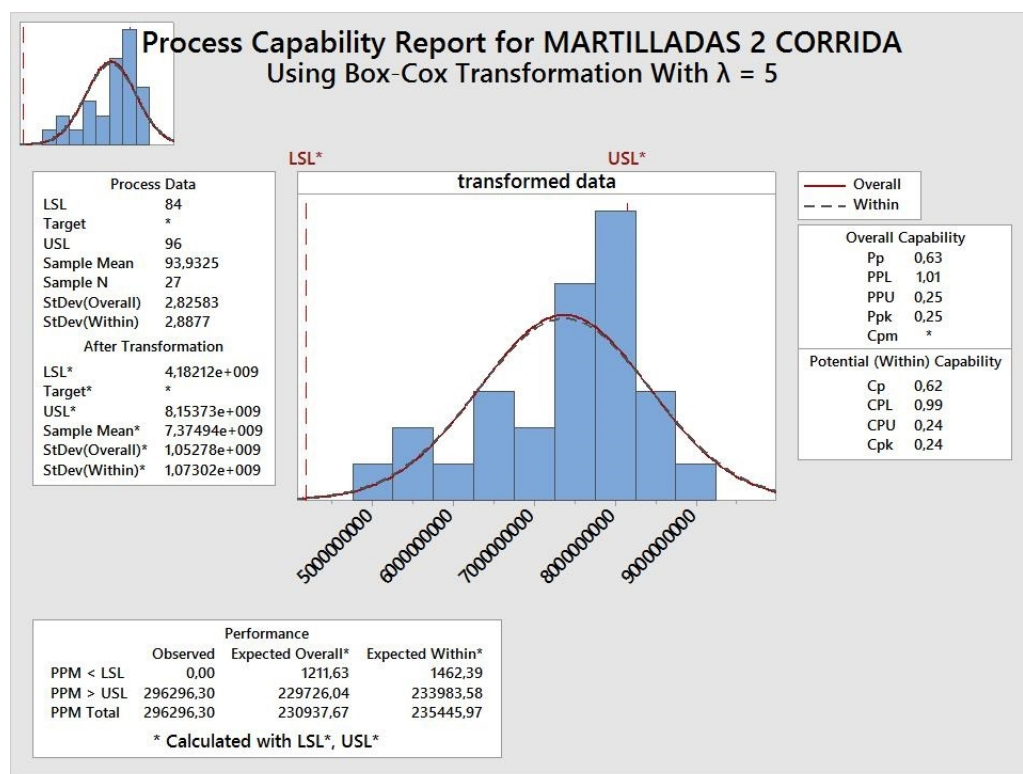


Figura 119: Capacidad de proceso mejorado. Lacas martilladas. Con Box-Cox.

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

De todas maneras, tanto usando como si no la transformación Box-Cox, se ve que los índices de capacidad mejoraron notablemente. C_p pasó de 0,06 a 0,69 y C_{pk} pasó de -0,20 a 0,24. Prácticamente mejoraron en 10 veces. Se ha mejorado la normalidad, hay menos dispersión de los datos y se evidencia control estadístico. Así y todo, el proceso se ubica en un nivel sigma aproximándose a 3, todavía lejos de la clase mundial. Esto ocurre posiblemente porque esta técnica es antigua y ocurre al aire libre, sin control de factores de error como humedad, temperatura y suciedad. Es posible que se trate de un proceso que intrínsecamente no puede mejorarse más. Sin embargo, este tipo de pintura que se lo seguirá manteniendo en la empresa, advirtiéndole al cliente respecto de sus limitaciones.

La desviación estándar del proceso es igual a 2,83 como se ve en los diagramas de normalidad, pero para llegar a un proceso con sigma=4, que es típico en las empresas que empiezan con la metodología Seis Sigma, esa desviación estándar debería bajar a 1 (considerando una perspectiva de corto plazo). En cuanto al centramiento respecto de la especificación ($90 \pm 6\%$), éste nunca ocurrirá porque mientras el punto medio de la misma permanece en 90%, el objetivo de la mejora del proceso es llegar al 100%. La especificación debería expresarse de otra manera, teniendo como límite superior el 100%, tal vez como $94 \pm 6\%$. En el caso de los procesos de pintura de la empresa, con meta óptima del 100% de adherencia, más que el centramiento respecto de la especificación, interesa reducir al mínimo la dispersión, es decir la variabilidad de los resultados del proceso.

CONTROL DEL PROCESO DE PINTURA ELECTROSTÁTICA

En lo que se refiere a las pinturas horneables, las conclusiones más importantes extraídas del ciclo DMAIC hasta este punto son las siguientes: (1) utilizar sólo pintura horneable en polvo, conocida también como electrostática (2) el tiempo transcurrido entre la limpieza de la superficie a pintar con

desoxidante y la aplicación misma de la pintura debe ser de CERO HORAS y (3) la temperatura óptima de cocido (dentro de la región experimental) es de 138°C. En el caso de los experimentos realizados, se utilizó el rango de temperaturas 120°C - 138°C porque con él se podía detectar variación de la adherencia, al menos con el método de medición utilizado, pero ello no implica que no puedan haber temperaturas mayores en las cuales ocurra una mejor adherencia, al menos hasta llegar a aproximadamente 150°C, que es cuando empieza a ocurrir un recocido y daño en la pintura. De hecho, ahora mismo se está trabajando en la producción normal con 145°C. En base a esas conclusiones, se procedió a extraer de la producción 9 subgrupos racionales de tamaño $n=3$. Los resultados de la medición del porcentaje de adherencia fueron:

Tabla 38:**Datos de adherencia. Pintura electrostática. Proceso mejorado**

SUBGRUPO 1	SUBGRUPO 2	SUBGRUPO 3	SUBGRUPO 4	SUBGRUPO 5	SUBGRUPO 6	SUBGRUPO 7	SUBGRUPO 8	SUBGRUPO 9
95,83	96,67	100	97,5	96,67	98,33	93,33	96,67	95,83
94,17	95,83	96,67	94,17	97,5	99,17	97,5	97,5	97,62
93,33	97,5	95,83	98,33	96,67	95	97,5	96,67	98,21

Tamaño Subgrupo Racional (n) = 3

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Aplicando los datos al MINITAB, los resultados fueron:

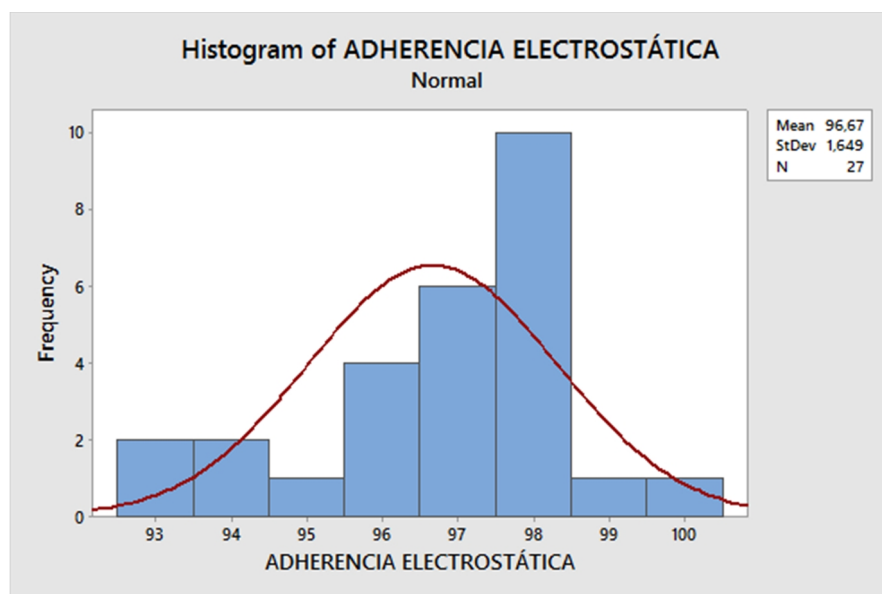
NORMALIDAD

Figura 129: Histograma de proceso mejorado. Pintura electrostática.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Cuando se seleccionó la pintura en polvo horneable (electrostática) como la única opción de pintura al horno a ser utilizada por la empresa, la desviación estándar del proceso bajó de 3,806 a 1,649, aunque la media de las medias sólo mejoró del 96,40% al 96,67%. En la Figura 121, se ve que, a pesar de ser un proceso intrínsecamente asimétrico hacia la derecha, existe una fuerte evidencia de normalidad en las salidas del mismo. El p-value es significativamente mayor que 0,05 (antes era igual a 0,024). En ese sentido, también el proceso mejoró.

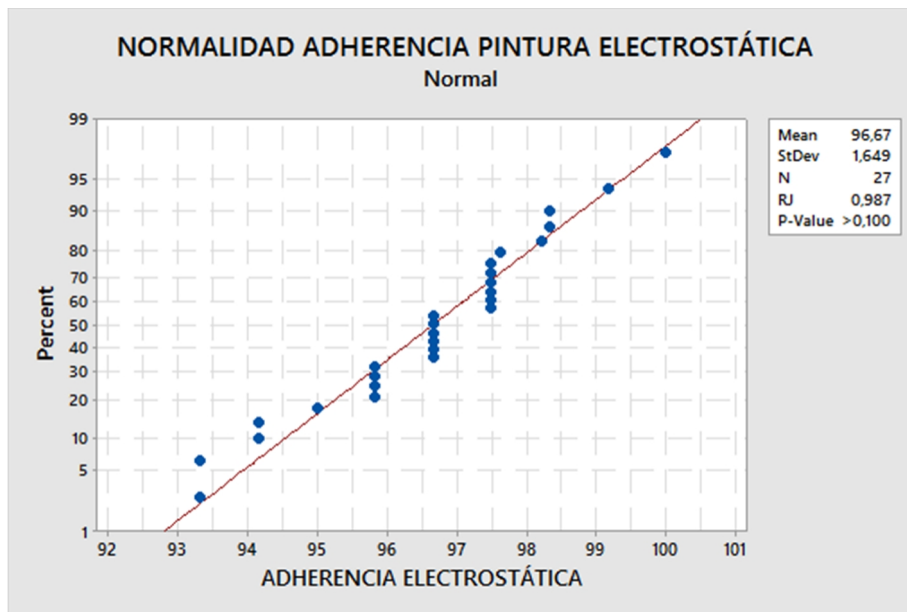


Figura 121: Normalidad de proceso mejorado. Pintura electrostática.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDROR

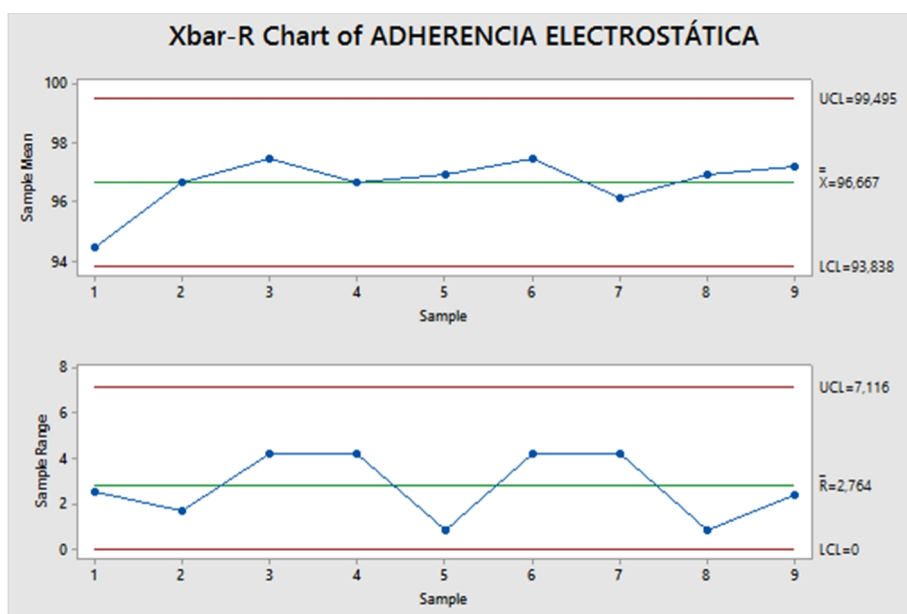


Figura 122: Cartas \bar{X} - R de proceso mejorado. Pintura electrostática.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDROR

En la Figura 122 se pueden ver las cartas de control $\bar{X} - R$. La aleatoriedad de los puntos es mejor que antes de la mejora del proceso, indicándose así que la probabilidad de presencia de causas especiales de variabilidad ha sido disminuida.

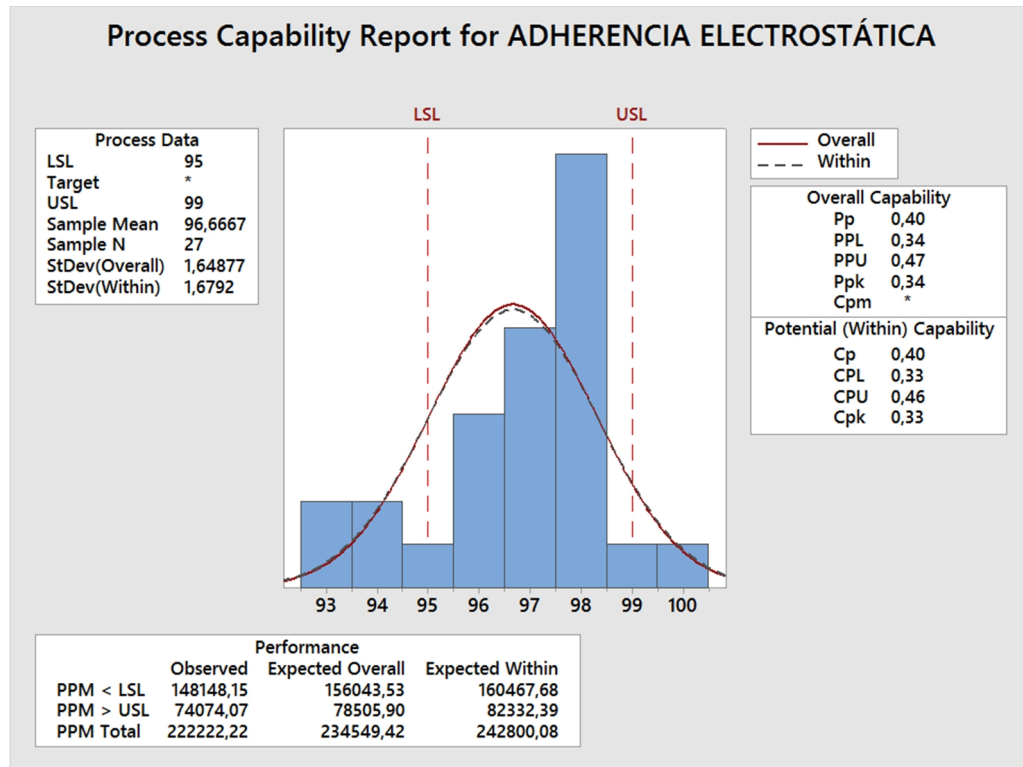


Figura 123: Capacidad de proceso mejorado. Pintura electrostática.
ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

Para la obtención de los datos mostrados en la Figura 123 no fue necesario realizar la transformación Box-Cox. Los índices de capacidad a corto y largo plazo mejoraron al doble. En particular, C_p subió de 0,19 a 0,40, pero así y todo el proceso sigue con un bajo desempeño. Ese nivel C_p lo ubica en una clase tipo 4, inadecuado para cumplir con las especificaciones, y que debe ser modificado. El porcentaje esperado de defectos es del 23%. Lejos de la clase mundial y de lo esperado por la metodología Seis Sigma.

Los datos de la Tabla 38 parecerían reportar excelentes niveles de adherencia, e incluso la media de las medias coincide prácticamente con el centro del rango de especificaciones (96,67% vs

97±2%), pero la variabilidad es excesiva. Para estar en un nivel de calidad mundial, la desviación estándar a corto plazo del proceso no debería exceder 0,67 y está en 1,65. El problema radica en que con los recursos actuales no se puede hacer más.

Desde el punto de vista técnico, las mejoras que pueden introducirse provienen de cuatro fuentes:

- 1) Adoptar el procedimiento de preparación de piezas metálicas por medio de la inmersión total en baños calientes que desengrasen la superficie por medio de detergentes, y después la sellen y fosfaticen con químicos, para una óptima adherencia.
- 2) Utilizar pintura electrostática de mejor calidad. La pintura actualmente utilizada es de origen nacional y de calidad sensiblemente menor a la de otras, importadas.
- 3) Diseñar un sistema de mejor control de las temperaturas internas en el horno. A pesar de que se cuenta con un ventilador que hace circular el aire caliente, al interior del horno existen zonas que presentan diferentes niveles de temperatura. Como la distribución no es uniforme, algunas piezas se curan a mayor temperatura de la especificada, y otras a menor temperatura que esa referencia. El resultado final es el aumento de la variabilidad del proceso.
- 4) El procedimiento de medición de la adherencia utilizado en los experimentos es de los más accesible, pero inexactos, e incluso subjetivos. Un mejor control del proceso requiere de mejoras en el sistema de medición. Existen aparatos especializados en esa función, pero bastante caros. Debe acompañarse la introducción de nueva tecnología con la práctica del análisis R&R

5. AULA VIRTUAL, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONSIDERACIONES Y ALCANCE DEL DISEÑO DE UN AULA VIRTUAL PARA CAPACITACIÓN SEIS SIGMA

El aula virtual que acompaña a la presente tesis ha sido construida para servir de apoyo a quien capacite a los técnicos de las PYMES interesadas en implementar la metodología Seis Sigma. Es una guía que puede servir también de fuente de consulta. Cumple con las siguientes condiciones:

- Extrae de la tesis el material que se considera útil para facilitar la exposición y el aprendizaje de la metodología Seis Sigma.
- Pretende ser un material que contextualiza por medio de ejemplos el desarrollo y aplicación de la metodología Seis Sigma y promociona activamente las ventajas de utilizarla.
- Sienta las bases para quien pretenda alcanzar después un mayor nivel de conocimiento en la metodología.
- Pone énfasis en el uso de ayudas informáticas y en el desarrollo de problemas prácticos.
- Como parte de esta tesis, se realiza una primera versión, resumida y con algunos ejemplos, pero deberá ser mejorada, ampliada y actualizada de manera permanente para que cumpla de manera óptima con su objetivo.
- Se espera que pueda estar al alcance de las pequeñas y medianas empresas que quieran conocer o capacitarse en Seis Sigma.

5.2. CONCLUSIONES

- Las PYMES de todo el mundo, y por supuesto en nuestro país, tienen una enorme incidencia económica. Generan más del 95% de los empleos a nivel planetario. En muchos países, como México, son las que generan la mayor parte de las exportaciones. Todos los gobiernos las cuidan y estimulan su crecimiento, capacitación y su capacidad de exportación. Parte de los requisitos para ser exitosas en el ámbito internacional es el manejo técnico de la administración y el conocimiento de las nuevas técnicas administrativas, informáticas y de comunicación. Seis Sigma puede facilitar la adquisición de este tipo de competencias, al mismo tiempo que incrementa su competitividad y productividad.
- La metodología Seis Sigma ha demostrado ser muy eficaz en la mejora de procesos, y su fortaleza mayor radica en el uso científico de herramientas administrativas y estadísticas. Además, Seis Sigma puede trabajar en armonía con Modelos de Calidad como la ISO 9000 y el EFQM. Ese ha sido uno de los motivos de su ingreso exitoso a muchas compañías a nivel mundial. La mayoría de las transnacionales y las Fortune 100 y Fortune 500 la han implementado y la viven culturalmente, en su día a día, obteniendo importantes resultados respecto de la satisfacción de sus clientes y de sus ganancias. En el aspecto financiero, el impacto de la implantación de Seis Sigma en las empresas ha alcanzado cifras notables. Además, Seis Sigma complementa exitosamente al Balanced Scorecard, ocupándose de impulsar las estrategias propuestas en los enfoques de corto plazo y de largo plazo. En particular, Seis Sigma ha demostrado ser un eficiente motor que empuja a la organización por el camino trazado en el enfoque de largo plazo que caracteriza al Balanced Scorecard. Pero no es condición que una empresa tenga un Balanced Scorecard para que se pueda aplicar exitosamente la metodología Seis Sigma. Es lo mejor, pero no absolutamente

condicionante. Una empresa puede sustentar su Sistema de Gestión de la Calidad en Seis Sigma.

- La metodología Seis Sigma es aplicable tanto a empresas de manufactura como a empresas proveedoras de servicios. De hecho, Seis Sigma está presente en las empresas ecuatorianas, manufactureras y de servicios. Hay empresas que la toman en serio, creen en ella y han invertido en su implantación. En la mayoría de los casos se trata de aplicaciones puntuales, pero hay casos de implantación a nivel cultural. No ha sido posible detectar casos de aplicación de Seis Sigma a las PYMES ecuatorianas. En otros países, por ejemplo Colombia, se han planteado verdaderas estrategias de inducción a Seis Sigma, como el Proyecto "Eficiencia en Pymes a través de Lean Seis Sigma" que empezó con el entrenamiento en la metodología de gerentes de 30 pequeñas y medianas empresas.
- En el Ecuador, la ejecución de proyectos puntuales se ha realizado por medio de la contratación de consultores externos, o por medio del desarrollo de tesis de pregrado y posgrado. Existen suficientes consultores y empresas de consultoría en nuestro medio que pueden desempeñar el papel de capacitadores en Seis Sigma y apoyar en la implantación de la metodología. La Academia ha tenido una participación más bien marginal en la formación de personal certificado en Seis Sigma.
- La gran mayoría de expertos en Seis Sigma insisten en que las pequeñas y medianas empresas (medianas en el caso de Ecuador) tienen muchas más ventajas que riesgos en la implantación de Seis Sigma. La experiencia demuestra que las pequeñas y medianas empresas pueden esperar retornos financieros de magnitud (relativa) muy similar a las que han ocurrido en las grandes transnacionales.

- Sin embargo, las empresas deben enfrentar con alta responsabilidad y seriedad el desarrollo a largo plazo de un proyecto que inicialmente es caro y complejo. Es difícil para empresas con ese tamaño de recursos equivocarse y volver a empezar. Si quieren garantizar un éxito que puede dar grandes satisfacciones en un plazo relativamente corto, deben emprender el proyecto en los mismos términos y con el mismo enfoque con que lo hacen las grandes empresas.
- La implantación de la metodología Seis Sigma en las medianas empresas ecuatorianas con más de 100 empleados no sólo es posible, si no recomendable. No existe impedimento de orden teórico o práctico para que esto no pueda hacerse, con un alto grado de retorno positivo de la inversión. El tamaño promedio de las medianas empresas en el país es de 40 empleados, pero habrá algunas con el tamaño suficiente.
- Las PYMES del país que presentan los mejores niveles de ingreso promedio por su trabajo son las del área de manufactura, por lo que el primer grupo objetivo para la implantación de la metodología Seis Sigma deberían ser las medianas empresas de esta área. Esta recomendación coincide con la necesidad urgente del país de impulsar la manufactura y el desarrollo de bienes de exportación, que no sean prescindibles o suntuarios para los clientes a los que van dirigidos.
- Desde el punto de vista de tamaño y recursos, en el caso de las pequeñas empresas ecuatorianas, no es práctica la implantación de Seis Sigma, como una forma de cultura permanente y con toda la infraestructura de equipo humano establecida como un estándar. Pero personal capacitado en la metodología sí puede enfrentar proyectos de menor

complejidad relativa. Se han desarrollado y se desarrollan con éxito proyectos puntuales, con enfoque Seis Sigma.

- Desde el punto de vista del nivel de formación del personal de las PYMES ecuatorianas, puede apreciarse en ellas un grado académico relativamente elevado, con una buena presencia de nivel universitario de tercer nivel, e incluso de directivos con maestrías y doctorados. Todo ello conduce a la apreciación de que este aspecto puede sustentar con solvencia la implantación de nuevas metodologías de administración, como lo es Seis Sigma.
- Se ha determinado que la metodología Seis Sigma puede afectar la creatividad de algún personal en ciertas empresas. La obsesión por mejorar los procesos existentes puede llevar a cierto nivel de estancamiento en el desarrollo de nuevos procesos. Esta puntualización debe tenerse presente cuando se trata de empresas que están constantemente diseñando nuevos productos y servicios. En ese caso, la organización más bien debería propiciar el diseño de nuevos productos y servicios con enfoque Seis Sigma. Para empresas que no diseñan ni lanzan nuevos productos o servicios, este riesgo es menor.
- El impacto de la Metodología Seis Sigma ha sido realmente importante, al punto de que se ha desarrollado software que ayuda específicamente en el manejo de las herramientas y del protocolo usado por esta metodología. Es el caso del Quality Companion.

Otros paquetes informáticos ya existentes, como el StatGraphics o el Minitab, contienen en su menú opciones que facilitan enormemente el manejo de las principales herramientas usadas por Seis Sigma. Otros, como el Design Expert, se han desarrollado específicamente para el Diseño Experimental, la herramienta estrella de Seis Sigma. Sin embargo, estos

paquetes informáticos tienen un precio relativamente elevado, que puede convertirse en un obstáculo a la hora de que una pequeña o mediana industria se decida por entrar en Seis Sigma.

5.3. RECOMENDACIONES

- Es importante reconocer y transmitir la enorme importancia de las PYMES en la economía ecuatoriana. Ellas, en su conjunto, generan más empleo y riqueza que las empresas grandes. Es importante que los estudiantes de administración comprendan ese hecho y se inclinen a fundarlas o gerenciarlas utilizando las mejores técnicas modernas disponibles. No por ser pequeñas las PYMES deben ser administradas de manera elemental o descuidada. Es necesario elevar su nivel de competitividad e impulsarlas hacia la exportación.
- Alguna entidad pública o privada debe realizar un trabajo de investigación orientado a obtener datos estadísticos de las PYMES respecto de su conocimiento e interés en la metodología Seis Sigma, así como de los factores de fortaleza y debilidad respecto de su implementación. Es importante también detectar las posibles áreas generadoras de proyectos Seis Sigma que reporten beneficios al mejorar procesos. Esta investigación puede ser tema de futuros trabajos de titulación.
- Propiciar desde la Academia un acercamiento de la pequeña y mediana empresa hacia la metodología Seis Sigma, como una forma de mejorar su capacidad administrativa, basada en métodos cuantitativos y con enfoque científico. Como parte de su trabajo de vinculación con la comunidad, es recomendable que la Academia se acerque a pequeñas y medianas empresas, a fin de propiciar su entendimiento y posterior capacitación en metodologías que usan las TIC's.

- Es importante desarrollar en la cultura organizacional de las PYMES la idea de que no siempre lo fácil o intuitivo conduce a las mejores metas en cuanto a competitividad y productividad. Es ineludible empezar a manejar técnicas con sustento cuantitativo y científico. No meras especulaciones de carácter subjetivo. Las modernas técnicas y metodologías, como es Seis Sigma, exigen estudio y esfuerzo, no son sencillas, pero la actual composición de las PYMES en cuanto a nivel académico de sus directivos y empleados se refiere, sugiere que es posible alcanzar esos niveles modernos de gestión.
- Estimular el desarrollo de trabajos de titulación cuyo tema sea la mejora de procesos mediante la aplicación de la metodología Seis Sigma en las pequeñas y medianas empresas, de manufactura y de servicios, como una manera de hacer evidente para estas organizaciones las ventajas de la adopción de formas técnicas de administración y de la utilización de las TIC's.
- Es importante que los administradores tomen decisiones basados en datos cuantitativos o cualitativos verificables. La mejora de procesos es un camino de gestión de la calidad universalmente utilizado en la actualidad, y se han desarrollado técnicas que permiten analizar procesos, determinar el grado de valor que agregan en el producto o servicio que llega al cliente, y finalmente mejorarlos. Sin embargo, la gran ventaja de Seis Sigma es que trabaja de manera científica y basada en datos y en índices. Hay una métrica bien consolidada por detrás, y es hacia allá donde debería orientarse la moderna formación de los administradores y los ingenieros del país. Debe fomentarse el espíritu y la actitud hacia la toma científica de decisiones.
- Uno de los más grandes avances de la administración modernas es el planteamiento de estrategias al más alto nivel (BSC), tales que dirijan las actividades de todos los recursos con que cuenta la empresa. Pero esas estrategias deben estar respaldadas por objetivos que

deben cumplirse en determinados grados propuestos. Uno de los más importantes motores que impulsan la persecución y el logro de objetivos es la mejora de procesos, pero dicha mejora debe ser medible y comparable con la propuesta que emana de la estrategia. Es por eso que se debe estimular en los estudiantes el uso intensivo de herramientas estadísticas, matemáticas e informáticas generadoras de datos confiables. La administración basada solamente en el sentido común o en la intuición no es suficiente para respaldar el cumplimiento de objetivos y estrategias. Al menos no lo es en un mercado en el que intervienen cada vez más organizaciones de clase mundial.

- Es importante desarrollar la necesidad de medición de la capacidad de procesos. La capacidad debe calcularse respecto de las especificaciones de los clientes, sobre todo. Pero, a falta de ellas, pueden establecerse especificaciones basadas en normas, en leyes o en el competidor que sea referente en el medio, en el mejor del mercado; o por lo menos en el mejor proceso similar interno. Un proceso no puede ser referencia de sí mismo, y en base a su desempeño actual proponer porcentajes de mejora. La referencia, la especificación, debe provenir de una fuente externa al proceso para ser útil, si no se puede entrar en un callejón sin salida e incluso se puede caer en el grave error de no detectar procesos intrínsecamente incapaces de generar competitividad. Por tanto, los estudiantes deben acostumbrarse a conseguir especificaciones para cada uno de los procesos que se desarrollan en su empresa, sobre todo para los procesos operativos, que son los que topan directamente al cliente.
- Si bien es cierto que Seis Sigma nació en la manufactura y es en esa área donde mejor se desenvuelve, debido al carácter cuantitativo de la salida de sus procesos, es importante transmitir el convencimiento de que es una metodología que se ha aplicado con igual éxito tanto a empresas productoras de bienes, como de servicios. Se debe llegar a las empresas de servicios promocionando los beneficios de la formación en el conocimiento y manejo de esta metodología.

- Se recomienda orientar inicialmente los esfuerzos de capacitación hacia las PYMES que se desenvuelven en el sector de la manufactura. Son las que presentan las condiciones más favorables para la implantación de Seis Sigma, y es el sector que necesita con mayor urgencia ser estimulado en su desarrollo.
- En general, los expertos están de acuerdo con que es más fácil implantar la metodología Seis Sigma en pequeñas y medianas empresas que en grandes empresas, pero siempre habrá que poner énfasis en la disciplina y responsabilidad que un propósito de esta naturaleza implica. Hay acuerdo en que una empresa grande, con recursos suficientes, puede hacer varios intentos, y fallar para volver a intentarlo; pero también hay acuerdo respecto de que, en general, una empresa con recursos limitados debe acertar a la primera vez.
- Al momento, existen consultores Seis Sigma en nuestro medio, pero es importante propiciar la formación de más profesionales, técnicos y consultores certificados que difundan la metodología, como está ocurriendo en países como Colombia. En lo que a la Universidad Católica se refiere, puede ser el momento de que la Facultad de Ciencias Administrativas y Contables diseñe cursos de extensión y de capacitación en el uso de la metodología Seis Sigma, e incluso que llegue a establecer programas de certificación Green Belt y Black Belt, procurando la colaboración de expertos con experiencia a nivel internacional.
- Debe quedar claro que lo deseable es que la metodología Seis Sigma se implante en la organización como una cultura de trabajo, día a día, y buscando por siempre proyectos de mejora. No siempre es posible sustentar un equipo de expertos a tiempo completo, pero siempre es posible desarrollar proyectos puntuales, a partir de técnicos internos bien

capacitados que dediquen parte de su tiempo a la mejora de los procesos, y que se soporten en consultores externos. Esta estrategia puede marcar un camino que, junto con el aumento de competitividad y el crecimiento consecuente, lleve a la final a la empresa a la cultura Seis Sigma.

- Existe abundante software orientado al manejo de las herramientas utilizadas por Seis Sigma por lo que se debe propiciar el uso intensivo del mismo, bastando una comprensión general de las bases estadísticas implicadas. Debe buscarse que las muchas entidades estatales creadas para apoyar a las PYMES ayuden con la provisión de licencias de uso de software a costos accesibles. Es importante tener presente que herramientas como el Diseño Experimental sólo han podido alcanzar su máximo grado de desarrollo gracias al uso de los computadores.
- La aplicación de la metodología Seis Sigma a los procesos de pintura en una pequeña empresa en la ciudad de Quito, tal como se la expone en el capítulo 4, se considera un caso de éxito, porque no sólo que clarificó los mejores niveles que por factor debían respetarse para mejorar los procesos y dilucidó qué tipo de factores debían ser eliminados definitivamente de la producción, sino que además detectó que el nivel tecnológico actual es insuficiente para aumentar la capacidad de los procesos de pintura, se haga lo que se haga. Como parte de las conclusiones de ese proyecto se proponen los pasos que en ese sentido deberán darse en el futuro, sujetos por supuesto a la disponibilidad financiera de la empresa.

Siendo éste un proyecto puntual, no sustentado por una cultura organizacional Seis Sigma, sin embargo se lo puede calificar como de enorme utilidad para la empresa, incluso porque los trabajadores implicados en el desarrollo de los experimentos comprendieron el peligro

de juzgar a priori los mejores niveles de operación de los factores de entrada de un proceso. Además está la ganancia invaluable respecto de la comprensión por parte de los trabajadores de la importancia de la disciplina en la ejecución de un proyecto y de la importancia de la exactitud del registro de los datos generados en su desarrollo.

Por tanto, no debe ser obstáculo el no contar con Champions, Master Black Belts, Black Belts, etc. para desarrollar un proyecto exitoso. Se puede con el recurso humano con que ahora mismo cuentan las PYMES del país. Sólo hace falta capacitarlo.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 Aguilar, A., Arghoty, A., Burgos, S., Gualavisí, M., Onofa, M., Ruiz, P., Sáenz, M., González, R., Muñoz, L., Sión, V., Zambrano, R., y Díaz, C. (2013). *Estudios industriales de la micro, pequeña y mediana empresa*. Quito; Gráficas V & M.
- 2 Bravo, J.(2009). *Gestión por Procesos*. Santiago de Chile; Evolución S.A.
- 3 Brue, G. (2003). *Seis Sigma para Directivos*. Madrid; McGraw-Hill.
- 4 González, T.Y., & Insuasti, R.F. (2004).*Diseño del modelo de una empresa proveedora de software multimedia para capacitación en gestión empresarial. Caso de aplicación: módulo de capacitación en liderazgo empresarial*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- 5 Buestán, M. (2013). *Aplicación de la metodología Seis Sigma para reducir la pérdida de café al granel en una planta de envasado*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- 6 Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). *Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma*. México, D.F.; McGraw-Hill.
- 7 Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. México, D.F.; McGraw-Hill/ Interamericana.
- 8 Lalaleo, B.R. (2012). *Propuesta de mejoramiento del proceso de pintura mediante la metodología Six Sigma, caso: AYMESA*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- 9 León, M.E., & Salazar, D.M. (2013). *Mejoramiento del proceso de fabricación de espuma de poliuretano en la empresa Chaide y Chaide S.A. utilizando la metodología Lean Six Sigma*. Tesis de maestría no publicada, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- 10 Montgomery, D. (2004). *Control estadístico de la Calidad*. México, D.F.; Editorial Limusa S.A.
- 11 Pande, P., Neuman, R., y Cavanagh, R. (2004). *Las claves prácticas de Seis Sigma*. Madrid; McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.U.
- 12 Pérez, J.A. (2010). *Gestión por Procesos*. Madrid; Esie Editorial.
- 13 Pyzdek, T., y Keller, P. (2010). *The Six Sigma Handbook*. USA; McGraw-Hill.

14 Stratega (2008). "Informe de resultados de la Encuesta nacional a micro, pequeñas y medianas empresas de la industria manufacturera"

BOLETINES, PERIÓDICOS Y REVISTAS

15 BCE. "Boletín de Indicadores Sectoriales de Competitividad y Productividad"
Dirección General de Estudios.

16 gtz, CEPAL & CENPROMYPE (2009) Manual de la Micro, Pequeña y Mediana Empresa

S17 immonds, K. y H. Smith (1968). "The First Export Order: A Marketing Innovation".
British Journal of Marketing, Summer, pp 93-100.

18 Villavicencio J. (2006). "Factores críticos para el desempeño exportador de las MIPYMES". *Revista TEC Empresarial* 1 Ed. 1. Costa Rica.

19 Pana, J., Cheng, M. (2008). An Empirical Study for Exploring the Relationship between Balanced Scorecard and Six Sigma Programs. *Asian Pacific Management Review*, 13 (2), 481-496.

20 Tybout, J. (2000). "Manufacturing firms in developing countries: How well do they do and why?". *Journal of Economic Literature* 38(1): 11-44.

21 Fernández, Víctor y otros (2009). "Clusters y desarrollo regional en América Latina. Reconsideraciones teóricas y metodológicas a partir de la experiencia argentina". *Revista Eure* XXXV(106): 177-180, Diciembre.

22 Pallares, Zoilo (2007). *La asociatividad empresarial: Una respuesta de los pequeños productores a la internacionalización de las economías*. Diario de Negocios HOY, artículo "La asociatividad es la clave para generar el desarrollo empresarial". Proyectos de ACUDIR publicado el 13 agosto del 2009.

23 Cooper, R. (2001). *Winning at new products: accelerating the process from idea to launch*. New York; Perseus Book.

24 Encuesta Nacional de Micro, Pequeñas y Medianas empresas de la industria manufacturera, 2007.

INTERNET

- 25 <http://www.eumed.net/tesis-doctorales/2011/meec/Importancia%20de%20las%20PyMES.htm>
- 26 <http://ekosnegocios.com/negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=1217>
- 27 Ministerio Coordinador de la Producción, Empleo y Competitividad (MCPEC) (2010). Disponible en: www.produccion.gob.ec/programas-y-servicios.
- 28 <http://www.efqm.es/>
- 29 <http://www.slideshare.net/celestino7776/modelo-malcombaldrige>
- 30 Ministerio de Turismo (2010). "Turismo para todos". Disponible en: <http://www.turismo.gob.ec>.
- 31 <http://www.usergioarboleda.edu.co/pymes/noticia1.htm>
- 32 <http://asprotech.blogspot.com/2012/03/modelos-normas-metodologias-y-tecnicas.html>
- 33 [http://www.reliableplant.com/Read/4285/report-finds-six-sigma-has-saved-fortune-500-\\$427b](http://www.reliableplant.com/Read/4285/report-finds-six-sigma-has-saved-fortune-500-$427b)
- 34 <http://www.ijoart.org/docs/Barriers-for-implementation-of-Six-Sigma-by-Small-and-Medium-Enterprises.pdf>
- 35 <http://www.monografias.com/trabajos99/evolucion-calidad/evolucion-calidad.shtml>
- 36 <http://www.swdsi.org/swdsi08/paper/SWDSI%20Proceedings%20Paper%20S753.pdf>
- 37 <http://www.swdsi.org/swdsi08/paper/SWDSI%20Proceedings%20Paper%20S753.pdf>
- 38 <http://web.cortland.edu/matresearch/SeisSigma.pdf>
- 39 <http://www.linkedin.com/groups/Toyota-Production-System-versus-Six-117127.S.209069888>
- 40 <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4938/1/UPS-QT02853.pdf>
- 41 <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5395/1/AC-COMPUTACI%C3%93N-ESPE-033210.pdf>
- 42 <http://www.ekosnegocios.com/revista/pdf/205.pdf>
- 43 http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:zNuPb293Q5sJ:www.icicm.com/files/FASE_DEFINICION_BB.doc+&cd=5&hl=es&ct=clnk&gl=ec
- 44 <http://javiermegias.com/blog/2012/03/debes-buscar-clientes-para-tu-producto-o-productos-para-tu-cliente/>
- 45 <http://emprendedorasenred.com.ar/862-c%C3%B3mo-determinar-lo-que-el-cliente-quiere>
- 46 <http://web.Cortlan.edu/matresearch/SeisSigma.pdf>

47 http://qualityamerica.com/Knowledgecenter/leansixsigma/does_six_sigma_work_in_smaller_companies_.asp

48 <http://www.sixsigmaonline.org/six-sigma-training-certification-information/articles/can-six-sigma-work-for-small-companies.html>

49 http://www.qualitydigest.com/april05/articles/02_article.shtml

50 http://qualityamerica.com/Knowledgecenter/leansixsigma/does_six_sigma_work_in_smaller_companies_.asp

51 <http://ekosnegocios.com/negocios/verArticuloContenido.aspx?idArt=1221>

52 <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7940/El%20teorema%20central%20del%20limite.pdf?sequence=3>

53 http://www.dm.uba.ar/materias/estadistica_Q/2008/1/EstadQuimDistConjyTCL.pdf

54 <http://dxsp.sergas.es/ApliEdatos/Epidat/Ayuda/4-Ayuda%20Distribuciones%20de%20probabilidad.pdf>

55 <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/math/dice.html>

56 <http://www.elosidelosantos.com/sergiman/div/tablnorm.html>

ANEXO 1

HERRAMIENTAS USADAS POR LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA

HERRAMIENTA	DEFINIR	MEDIR	ANALIZAR	MEJORAR	CONTR.
AMFE					
Análisis de componentes de varianza					
Análisis de varianza					
Análisis de los sistemas de medida, R&R					
Análisis de partes interesadas					
Análisis de Tolerancias					
Análisis de Valor					
Árbol CTQ					
Árbol de Soluciones					
Capacidad de Procesos					
Contraste de hipótesis: t - test					
Contraste de hipótesis: t - test pareado					
Diagrama de Afinidad					
Diagrama de Despliegue					
Diagrama de Dispersión					
Diagrama de Gantt					
Diagrama de Ishikawa: Causa-Efecto					
Diagrama de Pareto					
Diagrama SIPOC					
Diagrama de frecuencia					
Diagrama de Concentración					
Diagrama estratificado de frecuencia					
Diagramas Temporales					
Diseños de Superficies de Respuesta					
Diseños de Mezclas					
Diseños Factoriales de dos niveles					
Diseños Factoriales Fraccionales de dos niveles					
Diseños Plaket Burmann-factores significativos					
Diseños Robustos					
Estratificación					
Estudios R & R					
Fichas y Técnicas de Muestreo					
Gráficos de Sumas Acumulativas					
Gráficos para Control de series cortas					
Gráficos EWMA					
Gráficos Xi R RM					
Gráficos P, nP, C y U					
Gráficos X-R / X-S					
Histogramas					
Hojas de Comprobación					
Hojas de Confirmación					
Intervalos de Confianza					
Matriz Impacto Esfuerzo					
Métodos de Superficie de Respuesta					
Muestreo y Tamaño de muestra					
Multivarianza - Diagrama de Cajas					
Plan de Control de Proceso					
Plan de recogida de datos- Formulario de recogida de datos					
Project Charter					
QFD (CTQ) y Matrices Causa-Efecto					
Regresión					
Regresión Múltiple					
Regresión y Correlación					
Tabla de Planificación de Proyectos- PERT					
Test CHI-2 Tablas de Contingencia					
Tormenta de Ideas					

FUENTE: <http://web.cortland.edu/matresearch/SeisSigma.pdf>

ANEXO 2

TABLA PARA CÁLCULO DE CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PROYECTOS

EVALUACION DE ALTERNATIVAS PROYECTOS SIX SIGMA

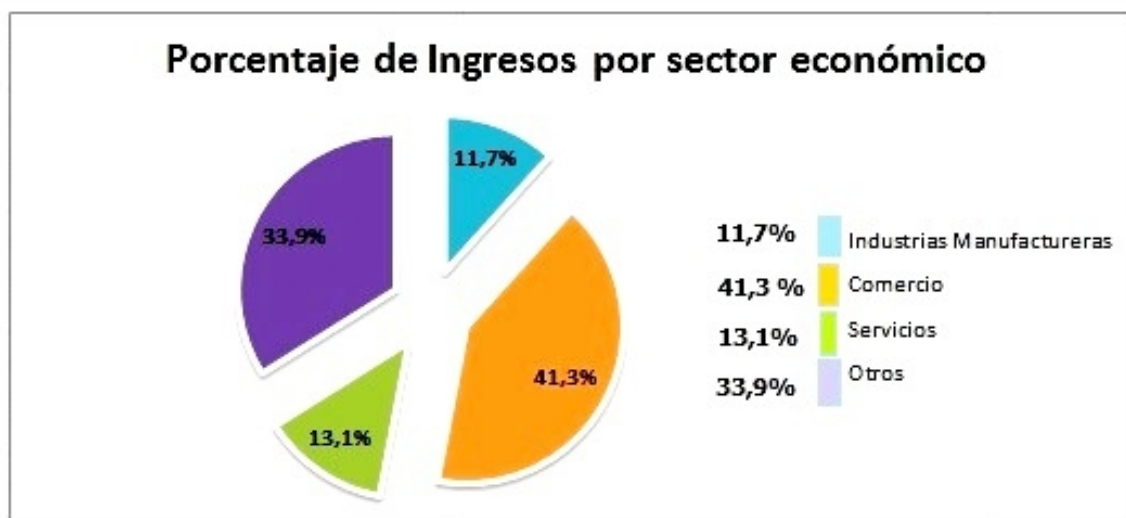
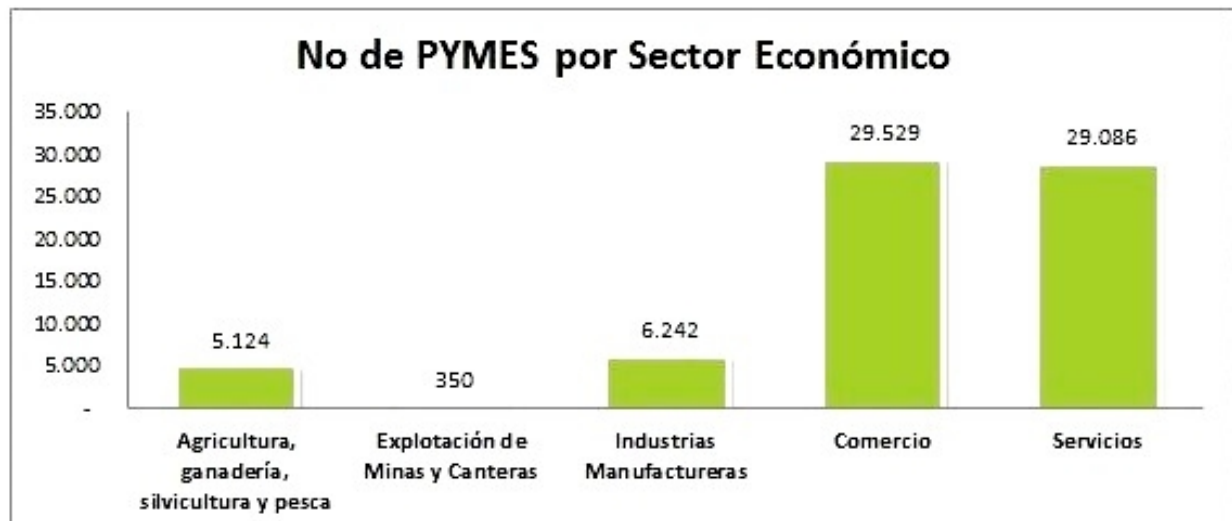
#		Retorno de Inversión	Potencial satisfacción de cliente	Alineamiento con la estrategia	Impacto (X)	Finalización a tiempo	Uso de la metodología	Otros esfuerzos	Recursos disponibles	Soluciones Predefinidas	Aplicabilidad (Y)	Posibilidad de medir beneficios (\$)	Total
1	Peso	3	5	3		4	4	2	3	3			
1	Disminuir tiempo del proceso de contratación	5	5	5	5,0	4	5	1	5	0	3,3	5	83
2	Nivel de servicio Centro de Atención	4	3	1	2,7	4	5	1	4	2	3,5	5	48
3	Cumplimiento a tiempo de respuesta N2 Tecnología	3	5	2	3,6	3	3	3	4	3	3,2	5	58
4	Disminuir reprocesos en solicitud de anticipos gastos de viaje	3	4	5	4,0	1	4	2	5	0	2,4	4	39
5	Debido proceso contratación	3	0	3	1,6	4	1	3	5	2	2,9	5	24
6	Tiempo de selección y contratación	5	4	5	4,5	2	3	3	2	3	2,6	1	12
7	Tiempo de estudios de compensación	5	3	5	4,1	2	2	2	2	2	2,0	2	16
8	Disminuir tiempo de causación de Facturas	5	3	2	3,3	1	1	2	5	0	1,7	1	6

Peso												
1	Bajo retorno	Poco	poco alineado		difícil	Aplicación limitada	Hay otras acciones en curso	No hay recursos disponibles	Existen soluciones predefinidas		Difícil medir	
5	Alto retorno	Mucho	muy alineado		fácil	Totalmente aplicable	No hay otras acciones	Hay recursos disponibles	No existen soluciones predefinidas		Fácil medir	

Fuente: CERTIFICACIÓN SIX SIGMA GREEN BELT, Escuela de Empresas, Universidad San Francisco de Quito, 2014

ANEXO 3

COMPOSICIÓN E INGRESOS DE LAS PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS



Fuente: INEC 2012 - 2013

ANEXO 4

EMPRESAS ENCUESTADAS PARA INVESTIGACIÓN DE NECESIDADES DE CAPACITACIÓN

1	ABBOTT LABORATORIOS DEL ECUADOR CIA. LTDA.
2	ACERIA DEL ECUADOR CA. ADELCA
3	ACERO COMERCIAL ECUATORIANO S.A.
4	AEC ECUADOR LTD
5	AERIA S.A.
6	AERO CONTINENTE S.A.
7	AEROLIAS NACIONALES DE COLOMBIA CA. AVIANCA
8	AGENCIAS Y REPRESENTACIONES CORDOVEZ SA
9	AGIP ECUADOR S.A.
10	AGIP OIL ECUADOR B.V.
11	AGLOMERADOS COTOPAXI SOCIEDAD ANONIMA
12	AIR FRANCE SUCURSAL EN ECUADOR
13	ALCATEL DEL ECUADOR SA
14	ALIMENTOS ECUATORIANOS SA. ALIMEC
15	ALVAREZ BARBA SA
16	AMAZONASHOT (HOTELERIA, ORGANIZACIONES Y TURISMO) S.A.
17	ANDINATEL S.A.
18	APARTAMENTOS Y HOTELES ECUATORIANOS APARTEC SA
19	ARBEQUADOR CIA. LTDA.
20	ARROW AIR INC.
21	ARTEFACTOS ECUATORIANOS PARA EL HOGAR S.A. ARTEFACTA
22	ASESORIA TECNICA E INGENIERIA, ASTECNIA C.L.
23	ASVALTO S.A.
24	ATU ARTICULOS DE ACERO SA
25	AUTOFENDI S.A.
26	AUTOLANDIA SA
27	AUTOMOTORES Y ANEXOS SA. AYASA
28	AUTOMOTORES Y COMERCIO AUTOCCOM CIA LTDA
29	B.J. SERVICES COMPANY S.A.
30	BAKER HUGHES INTERNATIONAL BRANCHES INC
31	BASF ECUATORIANA SA
32	BAXTER ECUADOR S.A.
33	BAYER S.A.
34	BEBELANDIA S.A.
35	BOEHRINGER INGELHEIM DEL ECUADOR CIA LTDA
36	BRISTOL-MYERS SQUIBB ECUADOR CIA. LTDA.
37	BUREAU VERITAS INSPECTION VALUATION ASSESSMENT AND CONTROL BIVAC B.V.
38	BURLINGTON RESOURCES ORIENTE LIMITED
39	CANAM OFFSHORE LIMITED
40	CAROOLUX AIRLINES INTERNATIONAL S.A.
41	CARVAJAL S.A. ECUADOR COMERCIALIZADORA CARVAJALTRADE
42	CASABACA S.A.
43	CAYMAN INTERNATIONAL EXPLORATION COMPANY S.A.
44	CEMENTOS SELVA ALEGRE S.A.
45	CENTRO DE RADIO Y TELEVISION CRATEL C.A.
46	CENTRO MEDICO QUIRURGICO PICHINCHA CENMEP SA

302	YPF SOCIEDAD ANONIMA
303	ZOGU S.A.

Fuente: González, T.Y., & Insuasti, R.F. (2004). *Diseño del modelo de una empresa proveedora de software multimedia para capacitación en gestión empresarial. Caso de aplicación: módulo de capacitación en liderazgo empresarial*. Tesis de maestría no publicada, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

ANEXO 5

NIVELES SEIS SIGMA - DPMO - BIEN A LA PRIMERA VEZ

NIVEL SIGMA	CENTRADA	DESPLAZADA 1,5 SIGMA	CENTRADA	DESPLAZADA 1,5 SIGMA
	DPMO	DPMO	BIEN A LA PRIMERA	BIEN A LA PRIMERA
3	2,699.93	66,810.63	0.99730007	0.93318937
3.5	465.35	22,750.35	0.99953465	0.97724965
4	63.37	6,209.70	0.99993663	0.99379030
4.5	6.802	1,349.97	0.99999320	0.99865003
5	0.574	232.67	0.99999943	0.99976733
5.5	0.038	31.69	0.99999996	0.99996831
6	0.002	3.40	1.00000000	0.99999660

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

ANEXO 6

**BIEN A LA PRIMERA VEZ EN FUNCIÓN DE NIVELES SEIS
SIGMA DESPLAZADOS Y DEL NÚMERO DE COMPONENTES**

	4 SIGMA	5 SIGMA	6 SIGMA
	DPMO 6.210	DPMO 232,7	DPMO 3,4
Número de componentes	BIEN A LA PRIMERA VEZ		
1	99,3790%	99,9767%	99,9997%
5	96,9335%	99,8837%	99,9983%
10	93,9610%	99,7676%	99,9966%
50	73,2382%	98,8432%	99,9830%
100	53,6383%	97,6999%	99,9660%
500	4,4399%	89,0163%	99,8301%
1000	0,1971%	79,2391%	99,6605%
5000	0,0000%	31,2390%	98,3140%

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

ANEXO 7

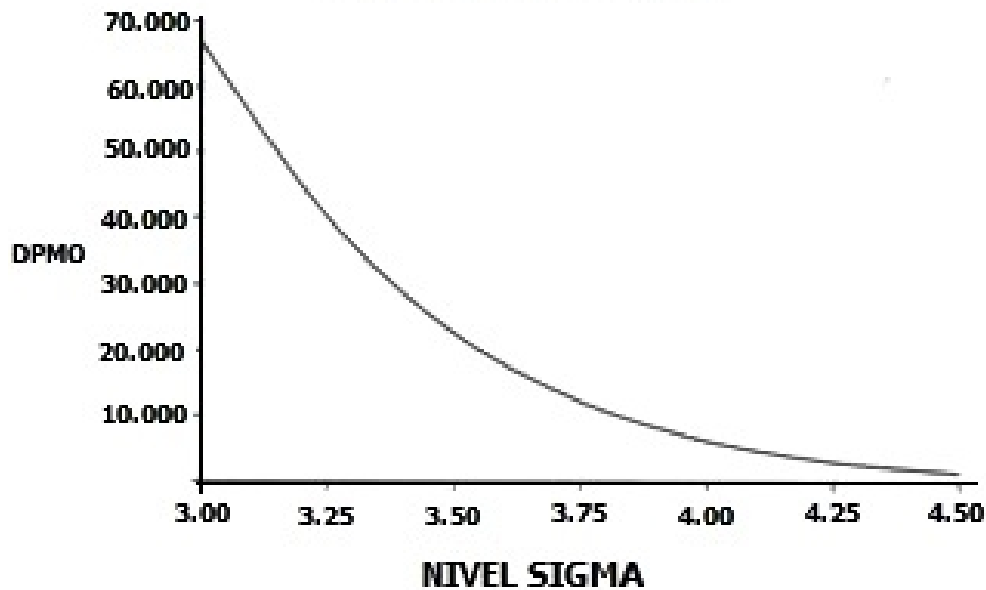
NIVEL DE COMPETITIVIDAD VS. NIVEL SIGMA

Nivel Sigma	Nivel de Calidad	DPMO	Costo de Calidad	Nivel Competitividad
1,0	30,9%	690.000	NA	Malo
2,0	69,2%	308.000	50%	Malo
3,0	93,3%	66.800	25-40%	Bajo
4,0	99,4%	6.210	15-25%	Típico
5,0	99,98%	320	5-15%	Alto
6,0	99,9997%	3,4	1%	Excelente

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

ANEXO 8

DPMO vs. NIVEL SIGMA



Fuente: Pyzdek, T. (2010). The Six Sigma Handbook. USA; McGraw-Hill.

ANEXO 9

PRUEBAS DE NORMALIDAD: CURTOSIS Y SESGO

$$Ku = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum [(x_i - \bar{x}) / s]^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$$

$$Sk = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum [(x_i - \bar{x}) / s]^3$$

ELABORADO POR BOLÍVAR CÓNDOR

ANEXO 10

COMPARACIÓN DE MUESTREO DE POBLACIÓN Y MUESTREO DE PROCESOS TRABAJANDO CON ELEMENTOS SIMILARES

MUESTREO DE POBLACIÓN	MUESTREO DE PROCESOS
Calcular el monto promedio de los préstamos concedidos por un banco en el transcurso de un año.	Calcular las cantidades promedio de préstamos concedidos por el banco por día, por semana y por mes.
Registrar la antigüedad promedio de los ítems almacenados en la bodega de una empresa. Realizar una curva de Pareto de los ítems respecto de su valor monetario acumulado.	Calcular los consumos mensuales promedio de los ítems A de la bodega. Calcular las desviaciones estándar de dichos consumos.
Contabilizar el número de quejas de los clientes y sus motivos, ocurridas durante el año en curso.	Calcular el promedio diario de quejas, así como la cantidad de quejas recibida cada hora.
Registrar el número de reprocesos ocurridos el año pasado debido a artículos entregados con defecto por la sección pintura.	Calcular el nivel DPMO del proceso de pintura.

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

ANEXO 11 (a)

**APROXIMACIONES DE LAS DISTRIBUCIONES DISCRETAS A LA
DISTRIBUCIÓN NORMAL**

DISTRIBUCIÓN	FÓRMULA	CONDICIÓN	MEDIA μ	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
Binomial	$P(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{(n-k)}$ <p>n= número de experimentos k= número esperado de éxitos p= proporción de éxitos en la población q= 1-p</p>	n grande (>100); ni p ni q próximos a cero	$\mu = np$	$\sigma = \sqrt{npq}$
Poisson	$p(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$ <p>λ= tasa de ocurrencia x= número esperado de eventos</p>	n grande (>100); λ grande	$\mu = \lambda$	$\sigma = \sqrt{\lambda}$
Geométrica	$p(x) = p(1-p)^{x-1}$ <p>x= número de ensayos hasta el primer éxito</p>	N.A.	$\mu = \frac{1}{p}$	$\sigma = \sqrt{\frac{1-p}{p^2}}$
Hipergeométrica	$p(x) = \frac{\frac{k!}{n!(n-k)!} \times \frac{(N-k)!}{(n-x)!(N-k-n+x)!}}{\frac{N!}{n!(N-n)!}}$ <p>x= número de éxitos esperados en la muestra k= número de éxitos en la población N= tamaño de la población (N>0, finita) n= tamaño de la muestra x<k; 0<k<N; 0<n<N; n<N-k; 0<x<n</p>	N grande n < 0,1 N n < 0,1 k	$\mu = \frac{nk}{N}$	$\sigma^2 = \frac{nk}{N} \left(1 - \frac{k}{N}\right) \left(\frac{N-n}{N-1}\right)$

Nota: los criterios exactos de “grande” pueden consultarse en:

http://www.vosesoftware.com/ModelRiskHelp/index.htm#Distributions/Approximating_one_distribution_with_another/Approximations_to_the_Hypergeometric_distribution.htm

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

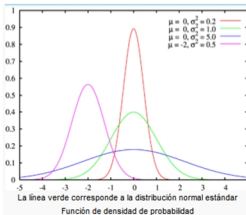
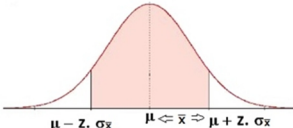
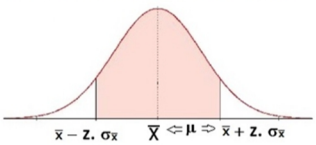
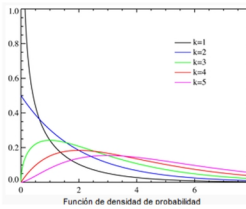
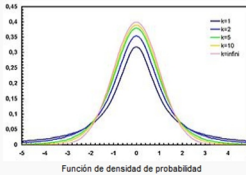
ANEXO 11 (b)

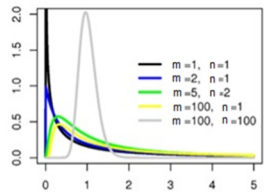
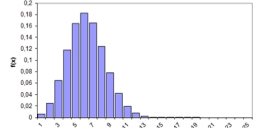
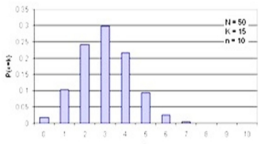
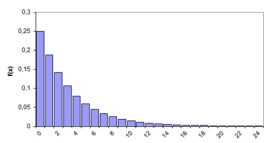
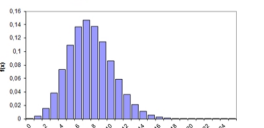
**APROXIMACIONES DE LAS DISTRIBUCIONES CONTINUAS A LA
DISTRIBUCIÓN NORMAL ESTANDAR N (μ,σ)**

DISTRIBUCIÓN	FÓRMULAS	CONDICIÓN	μ en:	VARIANZA
Chi Cuadrado	$\chi_k^2(x) = \frac{x^{k/2-1} e^{-x/2}}{2^{k/2} \Gamma(k/2)}$ <p>Donde el parámetro k de χ_k^2, se denomina grados de libertad de la distribución. Γ es la distribución Gamma</p>	n > 30	$\chi^2 = n$	$\sigma^2 = 2n$
F	$f(x) = \frac{\Gamma(\frac{m+n}{2})}{\Gamma(\frac{m}{2})\Gamma(\frac{n}{2})} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{n}{2}} x^{\frac{m}{2}-1} \left(1 + \frac{m}{n}x\right)^{-\frac{m+n}{2}}$ <p>Γ es la distribución Gamma m son los grados de libertad del numerador n son los grados de libertad del denominador</p>	<p>μ existe si: n ≥ 3</p> <p>σ² existe si: n ≥ 5</p>	$F = \frac{n}{n-2}$	$\sigma^2 = \frac{2n^2(m+n-2)}{m(n-2)^2(n-4)}$
T de Student	$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S(x)/\sqrt{n}}$	n > 30	t = 0	$\sigma^2 = \frac{n}{n-2}$

ANEXO 12

DISTRIBUCIONES NORMAL Y RELACIONADAS CON LA NORMAL

NOMBRE	FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD	FORMA DE LA CURVA	FORMULAS PARA INTERVALOS DE CONFIANZA		PROPIEDADES Y USOS
			Estadísticos para Intervalos / p value		
NORMAL	$p(x) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi) \cdot \sigma}}exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	 <p>La línea verde corresponde a la distribución normal estándar Función de densidad de probabilidad</p> $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$ <p>VARIANZA DE LA POBLACIÓN</p> $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$ <p>VARIANZA DE LA MUESTRA</p>	<p>Si se conoce σ de la Población:</p> $z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad \sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ <p>si $n \geq 0,05N$: $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$</p> <p>EN PROPORCIONES: Si $np \geq 5$ y $nq \geq 5$, entonces $\bar{x} = p$ y $S_p = \sqrt{pq/n}$</p> <p>INTERVALO DE LA MEDIA MUESTRAL ALDEDEDOR DE μ</p>  <p>$\mu - Z \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad \mu \Leftarrow \bar{x} \Rightarrow \mu + Z \cdot \sigma_{\bar{x}}$</p> <p>INTERVALO DE LA MEDIA POBLACIONAL ALREDEDOR DE \bar{x}</p>  <p>$\bar{x} - Z \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad \bar{x} \Leftarrow \mu \Rightarrow \bar{x} + Z \cdot \sigma_{\bar{x}}$</p> <div>OTROS INTERVALOS DE CONFIANZA VER EN EL ANEXO 13</div> <div>$P\text{-value} = 1 - \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\Pi}} e^{\frac{-(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} du$</div>		<ol style="list-style-type: none">1) Base de la Estadística Descriptiva2) Base de la inferencia estadística (Estimaciones de la Población en base a la muestra).3) Distribución muestral de las Medias.4) Clave en el Estudio de Probabilidades.5) Límite de varias distribuciones de probabilidad discretas y continuas.6) Pruebas de Hipótesis.7) Teorema del Límite Central.8) La suma o diferencia de distribuciones normales da otra distribución normal.9) Estimación por Mínimos Cuadrados10) Diseño de Experimentos: Explicación causal
CHI CUADRADO	$\chi_k^2(x) = \frac{x^{k/2-1} e^{-x/2}}{2^{k/2} \Gamma(k/2)}$ <p>Donde el parámetro k de χ_k^2, se denomina grados de libertad de la distribución. Γ es la distribución Gamma</p>	 <p>Función de densidad de probabilidad</p>	$\chi^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma^2}$ $\chi_{calc}^2 = \sum \frac{(f_0 - f_e)^2}{f_e}$ <p>f_0: Frecuencia del valor observado. f_e: Frecuencia del valor esperado.</p>	$P\text{-value} = 1 - \int_0^X \frac{x^{k/2-1} e^{-x/2}}{2^{k/2} \Gamma(k/2)}$	<ol style="list-style-type: none">1) Pruebas para estadísticos que siguen una distribución Chi Cuadrado si la Hipótesis Nula es cierta: Homogeneidad, Independencia y Bondad de Ajuste.2) Estimación de Varianzas de muestras procedentes de poblaciones normales.3) A través de t de Student: Regresión por Mínimos Cuadrados.4) A través de F: ANOVA
t de Student	$f(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\Gamma(k/2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{k\pi}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{x^2}{k}\right)^{\frac{k+1}{2}}}$ <p>Γ es la distribución Gamma k son los grados de libertad</p>	 <p>Función de densidad de probabilidad</p>	$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S(x)/\sqrt{n}}$ $S^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	$P\text{-value} = 1 - \int_{-\infty}^t \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\Gamma(k/2)} \cdot \frac{1}{\sqrt{k\pi}} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{t^2}{k}\right)^{\frac{k+1}{2}}}$	<ol style="list-style-type: none">1) Diferencia de medias muestrales cuando se desconoce la varianza de la población normal. Las muestras tienen menos de 30 elementos.2) Intervalo de confianza para la diferencia entre las medias de dos poblaciones, cuando se desconoce la varianza típica de una población y ésta debe ser estimada a partir de los datos de una muestra.3) Distribución muestral de medias para $n < 30$. Error muestral para $n < 30$.4) Regresión por Mínimos Cuadrados.5) ANOVA - LSD.6) Pruebas de Hipótesis.

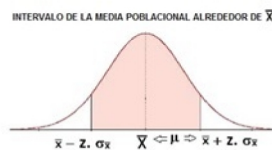
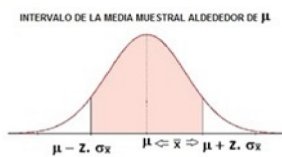
F	$f(x) = \frac{\Gamma(\frac{m+n}{2})}{\Gamma(\frac{m}{2})\Gamma(\frac{n}{2})} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{n}{2}} x^{\frac{m}{2}-1} \left(1 + \frac{m}{n}x\right)^{-\frac{m+n}{2}}$ <p>Γ es la distribución Gamma m son los grados de libertad del numerador n son los grados de libertad del denominador</p>		$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$	$P\text{-value} = 1 - \int_0^X f(x) dx = \frac{\Gamma(\frac{m+n}{2})}{\Gamma(\frac{m}{2})\Gamma(\frac{n}{2})} \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{n}{2}} x^{\frac{m}{2}-1} \left(1 + \frac{m}{n}x\right)^{-\frac{m+n}{2}}$	1) Intervalos de Confianza. 2) Pruebas de Hipótesis. 3) Inferencia estadística para contrastación de varianzas. 4) ANOVA
BINOMIAL	$P(k) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k q^{(n-k)}$ <p>n= número de experimentos k= número esperado de éxitos p= proporción de éxitos en la población q= 1-p</p>		$\mu = np$ $\sigma = \sqrt{npq}$	$P\text{-value} = 1 - \sum_{i=0}^{x-1} p^i \cdot q^{1-i}$	Para poblaciones infinitas (con reposición). Para experimentos Bernoulli. Permite calcular la probabilidad de que se obtenga un número dado de éxitos (k), a partir de un número dado de intentos (n), y de una proporción de éxitos conocida y constante para un proceso dado (p).
HIPERGEOMÉTRICA	$p(x) = \frac{k!}{n!(n-k)!} \times \frac{(N-k)!}{(n-x)!(N-k-n+x)!} \frac{N!}{n!(N-n)!}$ <p>x= número de éxitos esperados en la muestra k= número de éxitos en la población N= tamaño de la población (N>0, finita) n= tamaño de la muestra x<k; 0<k<N; 0<n<N; n<N-k; 0<x<n</p>		$\mu = \frac{nk}{N}$ $\sigma^2 = \frac{nk}{N} \left(1 - \frac{k}{N}\right) \left(\frac{N-n}{N-1}\right)$	$P\text{-value}(x) = 1 - \sum_{i=0}^{x-1} \frac{k!}{n!(n-k)!} \times \frac{(N-k)!}{(n-i)!(N-k-n+i)!} \frac{N!}{n!(N-n)!}$	Para poblaciones pequeñas en las que la proporción éxito/fracaso no se mantiene constante. Los experimentos posteriores dependen de los anteriores, pues no hay reposición (por tanto, no se trata de un experimento Bernoulli). Intenta predecir la probabilidad de hallar un número dado de éxitos (x) en una muestra de tamaño n, a partir de la proporción conocida de éxitos (k) en la población total, que es de tamaño N.
GEOMÉTRICA	$p(x) = p(1-p)^{x-1}$ <p>x= número de ensayos hasta el primer éxito</p>		$\mu = \frac{1}{p}$ $\sigma = \sqrt{\frac{1-p}{p^2}}$	$P\text{-value} = p^x$	Aplicable a ensayos Bernoulli, para poblaciones infinitas en las que la relación éxito/fracaso permanece constante, permite calcular el número de ensayos (x) que es necesario realizar hasta encontrar el primer éxito. En la población se tiene una proporción p de éxitos y una proporción q de fracasos.
POISSON	$p(x) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!}$ <p>λ= tasa de ocurrencia X= número esperado de eventos</p>		$\mu = \lambda$ $\sigma = \sqrt{\lambda}$	$P\text{-value}(x) = 1 - \sum_{i=0}^{x-1} \frac{\lambda^i}{i!} e^{-\lambda}$	Considera una tasa conocida de ocurrencia λ , de eventos en el tiempo o en el espacio (defectos por metro, fallas por día, dientes por hora) para un proceso dado. En base a ese dato, se trata de predecir la probabilidad de que se presente un número esperado de eventos en esa unidad de tiempo o espacio.

ANEXO 13

LÍMITES DE LOS INTERVALOS DE CONFIANZA MÁS USADOS

PARÁMETRO A ESTIMAR	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
μ	$\bar{X} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad S_T = \frac{S}{\sqrt{n}}$	$\bar{X} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad S_T = \frac{S}{\sqrt{n}}$
σ^2	$\frac{(n-1)S^2}{\chi^2_{\alpha/2, n-1}}$	$\frac{(n-1)S^2}{\chi^2_{1-\alpha/2, n-1}}$
π	Si $np \geq 5$ y $nq \geq 5$, entonces $\bar{X} = p$ y $S_p = \sqrt{pq/n}$ $p - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$	Si $np \geq 5$ y $nq \geq 5$, entonces $\bar{X} = p$ y $S_p = \sqrt{pq/n}$ $p + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$
$\mu_1 - \mu_2$	$(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$ donde $S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}}$ n_1 = tamaño de la muestra de la población 1 n_2 = tamaño de la muestra de la población 2	$(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) + t_{\alpha/2, n_1+n_2-2} S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}$ n_1 = tamaño de la muestra de la población 1 n_2 = tamaño de la muestra de la población 2
$\frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}$	$\frac{S_1^2}{S_2^2} F_{1-\alpha/2, n, m}$ m = grados de libertad del numerador n = grados de libertad del denominador	$\frac{S_1^2}{S_2^2} F_{\alpha/2, n, m}$ m = grados de libertad del numerador n = grados de libertad del denominador
$\pi_1 - \pi_2$	$S_{p_i} = \sqrt{p_i q_i / n_i} \quad (p_1 - p_2) - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p_1(1-p_1)}{n_1} + \frac{p_2(1-p_2)}{n_2}}$ n_1 = tamaño de la muestra de la población 1 n_2 = tamaño de la muestra de la población 2	$S_{p_i} = \sqrt{p_i q_i / n_i} \quad (p_1 - p_2) + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{p_1(1-p_1)}{n_1} + \frac{p_2(1-p_2)}{n_2}}$ n_1 = tamaño de la muestra de la población 1 n_2 = tamaño de la muestra de la población 2

1. NOTA: Si se conocen μ y σ de una población, sin importar su modelo de distribución, entonces se pueden establecer Intervalos de Confianza para las medias muestrales, que sí exhiben una distribución normal; y si se conocen σ y \bar{X} , entonces se puede tener Intervalos de Confianza para μ alrededor de la media \bar{X} . En los dos casos se utiliza la distribución Normal.



2. NOTA:

$$\sigma_T = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{ó} \quad S_T = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Son fórmulas válidas si la población es infinita ($N > 50.000$) o es finita con reposición, y adicionalmente:

- Si $n \geq 30$ no es condición que los datos sigan una distribución normal.
- Si $n < 30$, los datos deben seguir una distribución normal.

Se usan también cuando la población es finita y si $n < 0,05 N$.

3. NOTA: EN TODA FÓRMULA DONDE APAREZCAN

$$\sigma_T = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{ó} \quad S_T = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Si la población es finita, pero $n \geq 0,05N$, entonces debe realizarse el ajuste con el factor:

$$\sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$$

4. NOTA: Si $n < 30$, se desconoce σ , por lo que se debe usar S , y la población tiene distribución normal, se debe usar la distribución t . Pero si $n < 30$, se desconoce σ y la población no es normal, no se pueden usar estas fórmulas.

5. NOTA: las fórmulas que sirven para calcular los límites de los intervalos de confianza referidos al/los parámetro(s) π , son válidas para muestras grandes y pequeñas, usan la distribución normal, y se aplican sólo si $np_i \geq 5$ y $nq_i \geq 5$.

No hay consideraciones de factores de ajuste, ni se utiliza la distribución t en caso alguno.

ANEXO 14

PRUEBAS DE HIPÓTESIS

Hipótesis	Estadística de prueba	Criterios de rechazo
VARIANZAS POBLACIONALES DESCONOCIDAS QUE PUEDEN SUPONERSE IGUALES $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_A : \mu_1 \neq \mu_2$ $H_A : \mu_1 > \mu_2$ $H_A : \mu_1 < \mu_2$	$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$ <p>donde</p> $S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$	$ t_0 > t_{\alpha/2, n_1 + n_2 - 2}$ $t_0 > t_{\alpha, n_1 + n_2 - 2}$ $t_0 < -t_{\alpha, n_1 + n_2 - 2}$
VARIANZAS POBLACIONALES DESCONOCIDAS QUE NO PUEDEN SUPONERSE IGUALES $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_A : \mu_1 \neq \mu_2$ $H_A : \mu_1 > \mu_2$ $H_A : \mu_1 < \mu_2$	$t_0 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$ <p>donde</p> $v = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1 + 1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2 + 1}} - 2$ <p>$v =$ Grados de Libertad</p>	$ t_0 > t_{\alpha/2, v}$ $t_0 > t_{\alpha, v}$ $t_0 < -t_{\alpha, v}$
$H_0 : \pi_1 = \pi_2$ $H_A : \pi_1 \neq \pi_2$ $H_A : \pi_1 > \pi_2$ $H_A : \pi_1 < \pi_2$	$z_0 = \frac{p_1 - p_2}{\sqrt{p(1-p)\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$ <p>donde</p> $p = \frac{X_1 + X_2}{n_1 + n_2}$ <p>$X_1 =$ Éxitos en la muestra 1 ; $X_2 =$ Éxitos en la muestra 2 $P_1 =$ Proporción de la muestra 1 ; $P_2 =$ Proporción de la muestra 2</p>	$ z_0 > z_{\alpha/2}$ $z_0 > z_{\alpha}$ $z_0 < -z_{\alpha}$
MUESTRAS PAREADAS (DEPENDIENTES) $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ $H_A : \mu_1 \neq \mu_2$ $H_A : \mu_1 > \mu_2$ $H_A : \mu_1 < \mu_2$	$t_0 = \frac{\bar{d}}{S_d / \sqrt{n}}$ <p>\bar{d} = promedio de las diferencias muestrales S_d = desviación estándar de las diferencias muestrales n = tamaño de la muestra</p>	$ t_0 > t_{\alpha/2, n-1}$ $t_0 > t_{\alpha, n-1}$ $t_0 < -t_{\alpha, n-1}$

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

ANEXO 15

ANOVA DE UNA VÍA, PARA IGUALDAD DE MEDIAS

Se trata de probar la calidad de cuatro tipos de cuero que van a ser usados para fabricar suela de calzado. Estos cueros A, B, C y D disponibles en el mercado se someten a la misma prueba de abrasión, con un número dado de ciclos, para al final determinar la pérdida de material (en miligramos) experimentado por las muestras aleatorias que fueron sometidas a la máquina de pruebas. Los resultados se ven en la siguiente tabla:

TIPO DE CUERO	OBSERVACIONES						PROMEDIOS
A	264	260	258	241	262	255	256,7
B	208	220	216	200	213	206	209,8
C	220	263	219	225	230	228	230,8
D	217	226	215	227	220	222	220,7

Los promedios de pérdidas de peso para las cuatro muestras son aparentemente semejantes, pero se debe comprobar si es que los cambios en el factor cuero realmente producen una variación significativa en la salida. Esto se puede hacer planteando la siguiente prueba de hipótesis:

$$H_0: \mu_A = \mu_B = \mu_C = \mu_D$$

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j \quad \text{para algún nivel } i \text{ y algún nivel } j.$$

Si es que se comprueba la hipótesis nula, por medio de una prueba F, eso significa que el cuero no es un factor significativo en la duración de la suelas de calzado, pues todas las medias de desgaste son estadísticamente similares. Pero si es que una sola de las medias difiere de alguna otra, significa que el tipo de cuero sí tiene que ver con la calidad de las suelas. Además, debe tenerse presente que si el factor cuero es significativo para la calidad de la suela, el ANOVA lo detecta, pero no podría decir cuál de los tipos de cuero es el mejor. Para eso existen otras técnicas.

El estadístico utilizado es:

$$F = \frac{\text{Suma de los Cuadrados ENTRE} / (t - 1)}{\text{Suma de los Cuadrados INTRA} / (N - t)}$$

Donde t es el número de niveles que experimenta el factor cuero (en este caso, 4 tipos: A, B, C y D), y $N = 24$ es el total de observaciones.

Las fórmulas para el ANOVA DE UNA VÍA están implícitas en el ejemplo que se presenta, y debe considerarse que se complican conforme aumenta la complejidad de las entradas al proceso. Por ese motivo, es preferible utilizar software especializado para determinar la significancia del factor de entrada.

Para hallar $F_{\text{crítico}}$ se utiliza la significancia α con la que se desee trabajar. Los grados de libertad del numerador son iguales a $(t-1)$ y los del denominador son iguales a $(N-t)$. Se puede trabajar también con el valor- p .

ANOVA DE UNA VIA PARA CUATRO TIPOS DE CUERO

TABLA DE CÁLCULOS

$t = 4$ $K = 4$ $n = 6$ $N = 24$

NIVELES	OBSERVACIONES						PROMEDIOS	SUMAS	SUMAS ²	SUMAS ² n
A	264	260	258	241	262	255	256,67	1540,00	2.371.600,00	395.266,67
B	208	220	216	200	213	206	210,50	1263,00	1.595.169,00	265.861,50
C	220	263	219	225	230	228	230,83	1385,00	1.918.225,00	319.704,17
D	217	226	215	227	220	222	221,17	1327,00	1.760.929,00	293.488,17

SUMAS TOTALES: 5.515,00 1.274.320,50 (a)

SUMA TOTAL ²: 30.415.225,00

SUMA TOTAL ² / N: 1.267.301,04 (b)

VARIACION ENTRE = (a) - (b) = 7.019,46 (c)

OBSERVACIONES AL CUADRADO					
69696	67600	66564	58081	68644	65025
43264	48400	46656	40000	45369	42436
48400	69169	47961	50625	52900	51984
47089	51076	46225	51529	48400	49284

SUMA DE LAS OBSERVACIONES AL CUADRADO: 1.276.377,00 (d)

VARIACION TOTAL = (d) - (b) = 9.075,96 (e)

VARIACION ERROR = (e) - (c) = 2.056,50

TABLA DE ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA)

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	PROMEDIO DE LOS CUADRADOS = CUADRADO MEDIO = CM	ESTADÍSTICO F_0	VALOR CRÍTICO DE F ($\alpha = 0,05$)	p-value
Entre grupos	7.019,46	3	2.339,82	22,76	0,98	0,000001
Dentro de los Grupos (ERROR)	2.056,50	20	102,82			
Total	9.075,96	23				

Ho se rechaza si $F_0 > F_{\text{crítico}}$
Ho se rechaza si $p\text{-value} < 0,05$

POR TANTO, SE RECHAZA LA HIPÓTESIS NULA. LAS MEDIAS POBLACIONALES NO SON IGUALES.
EXISTE ALGÚN TIPO DE CUERO CON MEDIA POBLACIONAL DIFERENTE A OTRO.
EL FACTOR CUERO ES SIGNIFICATIVO.

FUENTE: Gutiérrez, H., y de la Vara, R.(2008). Análisis y diseño de experimentos. México,D.F.; McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.

ANEXO 16

METODO LSD PARA COMPARACIÓN DE MEDIAS

Un equipo de mejora de procesos está investigando el efecto de los métodos de ensamble A, B, C y D sobre el tiempo de ensamble de un componente, expresado en minutos. Se corren 16 pruebas en orden aleatorio, encontrándose los siguientes resultados:

MÉTODO DE ENSAMBLE	OBSERVACIONES				PROMEDIOS
A	6	8	7	8	7,25
B	7	9	10	8	8,5
C	11	16	11	13	12,75
D	10	12	11	9	10,5

Los promedios de tiempo que arrojan los cuatro métodos son aparentemente semejantes, pero se debe comprobar si es que los cambios en el factor “método de ensamble” realmente producen una variación significativa en la salida. Esto se puede hacer planteando la siguiente prueba de hipótesis:

$$H_0: \mu_A = \mu_B = \mu_C = \mu_D$$

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j \quad \text{para algún nivel } i \text{ y algún nivel } j.$$

La Tabla ANOVA resultante es la siguiente:

TABLA DE ANÁLISIS DE VARIANZA (ANOVA) - CUATRO MÉTODOS DE ENSAMBLE

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	PROMEDIO DE LOS CUADRADOS = CUADRADO MEDIO = CM	ESTADÍSTICO F_0	VALOR CRÍTICO DE F ($\alpha = 0,05$)	p-value
Entre grupos	69,50	3	23,17	9,42	0,984494	0,001771
Dentro de los Grupos (ERROR)	29,50	12	2,46			
Total	99,00	15				

Ho se rechaza si $F_0 > F$ crítico
Ho se rechaza si p-value < 0,05

POR TANTO, SE RECHAZA LA HIPÓTESIS NULA. LAS MEDIAS POBLACIONALES NO SON IGUALES.
EXISTE ALGÚN MÉTODO DE ENSAMBLE CON MEDIA POBLACIONAL DIFERENTE A OTRO.
EL FACTOR MÉTODO DE ENSAMBLE ES SIGNIFICATIVO.

Ahora, se debe comprobar cuáles son los pares de medias que son significativamente diferentes desde el punto de vista estadístico, para lo cual se plantean seis pares de hipótesis nulas y alternativas:

$$H_0 : \mu_A = \mu_B \text{ vs. } H_A : \mu_A \neq \mu_B$$

$$H_0 : \mu_A = \mu_C \text{ vs. } H_A : \mu_A \neq \mu_C$$

$$H_0 : \mu_A = \mu_D \text{ vs. } H_A : \mu_A \neq \mu_D$$

$$H_0 : \mu_B = \mu_C \text{ vs. } H_A : \mu_B \neq \mu_C$$

$$H_0 : \mu_B = \mu_D \text{ vs. } H_A : \mu_B \neq \mu_D$$

$$H_0 : \mu_C = \mu_D \text{ vs. } H_A : \mu_C \neq \mu_D$$

Por otro lado, se tiene que CM_E sacado de la Tabla ANOVA es igual a 2,46. El experimento es balanceado, con $n=4$, y los grados de libertad del error son iguales a 12. De allí que t , para un grado de confianza del 5%, en dos colas, es igual a 2,1788. Aplicando la Fórmula 25, se obtiene el valor de $LSD = 2,42$. Sacando los valores absolutos de las diferencias de los pares de medias, y comparándolos con ese valor se obtienen los siguientes resultados:

DIFERENCIA POBLACIONAL	ABSOLUTO DE DIFERENCIA DE MEDIAS	LSD	DECISIÓN
\bar{x}_A vs. \bar{x}_B	1,25	2,42	NO SIGNIFICATIVA
\bar{x}_A vs. \bar{x}_C	5,5	2,42	SIGNIFICATIVA
\bar{x}_A vs. \bar{x}_D	3,25	2,42	SIGNIFICATIVA
\bar{x}_B vs. \bar{x}_C	4,25	2,42	SIGNIFICATIVA
\bar{x}_B vs. \bar{x}_D	2	2,42	NO SIGNIFICATIVA
\bar{x}_C vs. \bar{x}_D	2,25	2,42	NO SIGNIFICATIVA

FUENTE: Gutiérrez, H., y de la Vara, R.(2008). **Análisis y diseño de experimentos.** México,D.F.; McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.

El resultado final es que las medias de A y C, de A y D, y las de B y C sí presentan diferencias significativas. Las medias de A y B, de B y D, y de C y D no tienen diferencias estadísticamente significantes. Puesto que los métodos de ensamble A y B presentan los menores tiempos promedios, y A excluye a C y D, se puede concluir que los mejores métodos de ensamble son el A ó el B, pero se necesitan otras herramientas para definir cuál de los dos es finalmente el mejor.

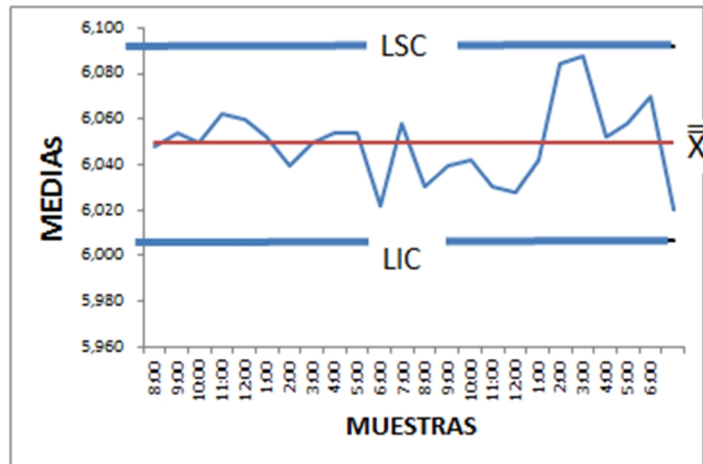
ANEXO 17

CARTA DE CONTROL \bar{X} - R

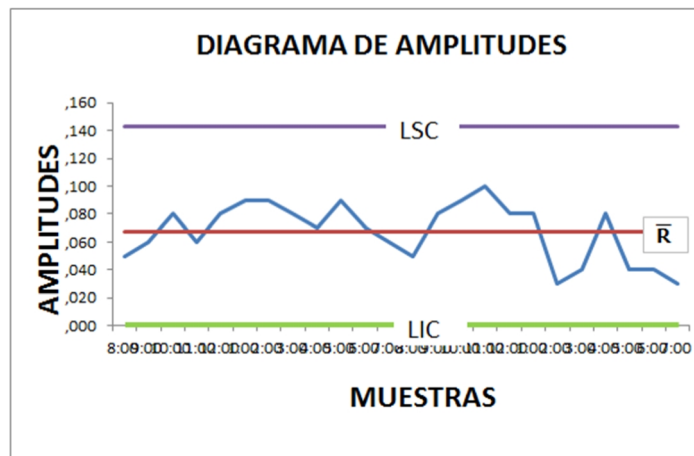
El técnico encargado del Control de Procesos verifica cada hora cinco piezas de la producción de una máquina cortadora. Mide cada pieza y registra las mediciones con aproximación a centésimos de pulgada. El registro de las primeras cuatro horas se muestra en la tabla. Diseñar un diagrama de medias y otro de amplitudes a fin de efectuar el control estadístico de la calidad de esta operación.

	ELEMENTOS DE MUESTRA					CÁLCULOS			
	HORA	1	2	3	4	5	R	RANGOS	\bar{X} MEDIAS
MUESTRAS	8:00 AM	6,07	6,05	6,02	6,07	6,03	0,0500		6,0480
	9:00 AM	6,06	6,04	6,09	6,03	6,05	0,0600		6,0540
	10:00 AM	6,03	6,09	6,09	6,03	6,01	0,0800		6,0500
	11:00 AM	6,05	6,08	6,06	6,03	6,09	0,0600		6,0620
	12:00 PM	6,10	6,05	6,09	6,04	6,02	0,0800		6,0600
	1:00 PM	6,01	6,01	6,10	6,05	6,09	0,0900		6,0520
	2:00 PM	6,05	6,04	6,02	6,00	6,09	0,0900		6,0400
	3:00 PM	6,02	6,07	6,10	6,02	6,04	0,0800		6,0500
	4:00 PM	6,05	6,09	6,05	6,02	6,06	0,0700		6,0540
	5:00 PM	6,01	6,05	6,10	6,05	6,06	0,0900		6,0540
	6:00 PM	6,07	6,00	6,02	6,02	6,00	0,0700		6,0220
	7:00 PM	6,08	6,02	6,08	6,08	6,03	0,0600		6,0580
	8:00 PM	6,01	6,04	6,02	6,06	6,02	0,0500		6,0300
	9:00 PM	6,07	6,02	6,00	6,03	6,08	0,0800		6,0400
	10:00 PM	6,10	6,02	6,06	6,02	6,01	0,0900		6,0420
	11:00 PM	6,01	6,02	6,10	6,02	6,00	0,1000		6,0300
	12:00 AM	6,00	6,00	6,00	6,06	6,08	0,0800		6,0280
	1:00 AM	6,08	6,02	6,00	6,03	6,08	0,0800		6,0420
	2:00 AM	6,07	6,09	6,10	6,07	6,09	0,0300		6,0840
	3:00 AM	6,06	6,10	6,09	6,10	6,09	0,0400		6,0880
	4:00 AM	6,09	6,09	6,06	6,01	6,01	0,0800		6,0520
	5:00 AM	6,06	6,06	6,04	6,08	6,05	0,0400		6,0580
	6:00 AM	6,09	6,07	6,05	6,09	6,05	0,0400		6,0700
	7:00 AM	6,04	6,03	6,01	6,01	6,01	0,0300		6,0200

\bar{X}	6,0495
\bar{R}	0,0675
A2	0,5770
LIC	6,01
LSC	6,09



\bar{R}	0,0675
D3	0,0000
D4	2,115
LIC	0,0000
LSC	0,1428



ANEXO 18

CARTA DE CONTROL $\bar{X} - S$

Una empresa fabrica envases de plástico, cuyo peso debe estar entre $28 \pm 0,5$ gramos. Cada media hora se toma un subgrupo de 10 envases y se pesa. Las medias y desviaciones estándar de los últimos 20 subgrupos son las siguientes:

MEDIAS:

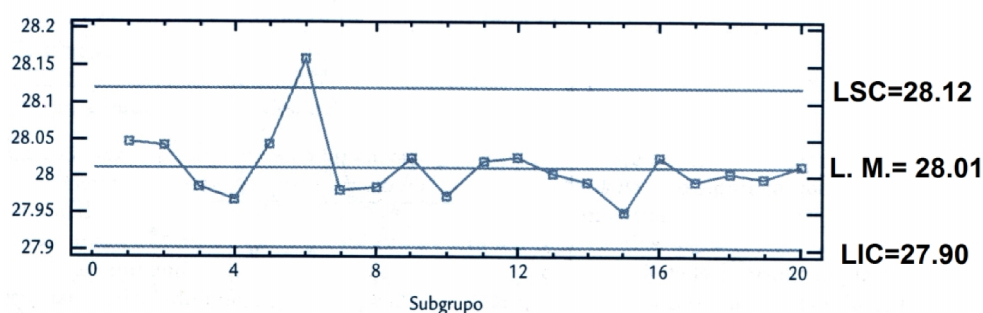
28.048	28.042	27.985	27.968	28.044	28.162	27.981
27.985	28.024	27.973	28.021	28.026	28.004	27.993
27.949	28.028	27.99	28.004	27.997	28.014	

DESVIACIONES ESTÁNDAR

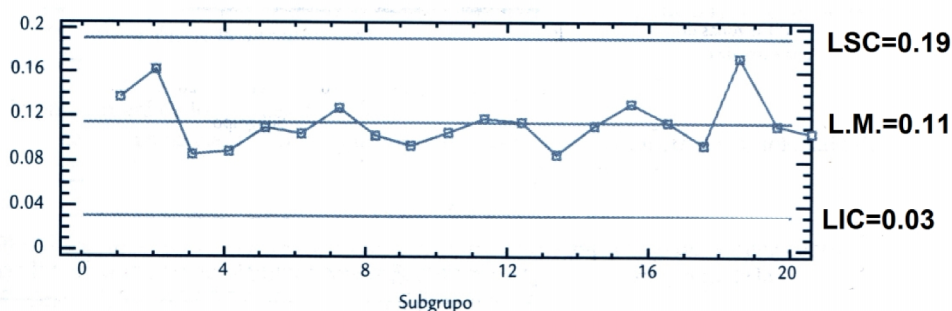
0.1343	0.1596	0.0846	0.0868	0.1086	0.1029	0.1241
0.1010	0.0924	0.1049	0.1157	0.1127	0.0841	0.1090
0.1285	0.1116	0.0927	0.1691	0.1083	0.1031	

Aplicando las expresiones de las Fórmulas 32 y 33, considerando que $\bar{\bar{X}} = 28.01$, $\bar{S} = 0.1117$ y que $C_4 = 0.9727$, se pueden construir las cartas de control $\bar{X} - S$ que se ven a continuación:

CARTA DE CONTROL DE MEDIAS



CARTA DE CONTROL DE DESVIACIONES ESTÁNDAR



Fuente: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

ANEXO 19

CONSTANTES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARTAS DE CONTROL

Tamaño de muestra, n	Carta \bar{X}	Carta R			Carta S	Estimacion de σ
	A_2	d_3	D_3	D_4	c_4	d_2
2	1.880	0.853	0.0000	3.2686	0.7979	1.128
3	1.023	0.888	0.0000	2.5735	0.8862	1.693
4	0.729	0.880	0.0000	2.2822	0.9213	2.059
5	0.577	0.864	0.0000	2.1144	0.9400	2.326
6	0.483	0.848	0.0000	2.0039	0.9515	2.534
7	0.419	0.833	0.0758	1.9242	0.9594	2.704
8	0.373	0.820	0.1359	1.8641	0.9650	2.847
9	0.337	0.808	0.1838	1.8162	0.9693	2.970
10	0.308	0.797	0.2232	1.7768	0.9727	3.078
11	0.285	0.787	0.2559	1.7441	0.9754	3.173
12	0.266	0.778	0.2836	1.7164	0.9776	3.258
13	0.249	0.770	0.3076	1.6924	0.9794	3.336
14	0.235	0.763	0.3281	1.6719	0.9810	3.407
15	0.223	0.756	0.3468	1.6532	0.9823	3.472
16	0.212	0.750	0.3630	1.6370	0.9835	3.532
17	0.203	0.744	0.3779	1.6221	0.9845	3.588
18	0.194	0.739	0.3909	1.6091	0.9854	3.640
19	0.187	0.734	0.4031	1.5969	0.9862	3.689
20	0.180	0.729	0.4145	1.5855	0.9869	3.735
21	0.173	0.724	0.4251	1.5749	0.9876	3.778
22	0.167	0.720	0.4344	1.5656	0.9882	3.819
23	0.162	0.716	0.4432	1.5568	0.9887	3.858
24	0.157	0.712	0.4516	1.5484	0.9892	3.898
25	0.153	0.708	0.4597	1.5403	0.9896	3.931

FUENTE: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

ANEXO 20

DEFECTUOSOS ESPERADOS PARA DIFERENTES ÍNDICES DE CAPACIDAD

Valor del índice (corto plazo)	Proceso con doble especificación (índice C_p)		Con referencia a una sola especificación (C_{pl} , C_{ps} , C_{pk})	
	% fuera de las dos especificaciones	Partes por millón fuera (PPM)	% fuera de una especificación	Partes por millón fuera (PPM)
0.2	54.8506%	548 506.130	27.4253%	274 253.065
0.3	36.8120%	368 120.183	18.4060%	184 060.092
0.4	23.0139%	230 139.463	11.5070%	115 069.732
0.5	13.3614%	133 614.458	6.6807%	66 807.229
0.6	7.1861%	71 860.531	3.5930%	35 930.266
0.7	3.5729%	35 728.715	1.7864%	17 864.357
0.8	1.6395%	16 395.058	0.8198%	8 197.529
0.9	0.6934%	6 934.046	0.3467%	3 467.023
1.0	0.2700%	2 699.934	0.1350%	1 349.967
1.1	0.0967%	966.965	0.0483%	483.483
1.2	0.0318%	318.291	0.0159%	159.146
1.3	0.0096%	96.231	0.0048%	48.116
1.4	0.0027%	26.708	0.0013%	13.354
1.5	0.0007%	6.802	0.0003%	3.401
1.6	0.0002%	1.589	0.0001%	0.794
1.7	0.0000%	0.340	0.0000%	0.170
1.8	0.0000%	0.067	0.0000%	0.033
1.9	0.0000%	0.012	0.0000%	0.006
2.0	0.0000%	0.002	0.0000%	0.001

FUENTE: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

ANEXO 21

RELACIONES CAPACIDAD - CALIDAD SIGMA

Calidad de corto plazo (suponiendo un proceso centrado)				Calidad de largo plazo con un movimiento de 1.5σ		
Índice C_p	Calidad en sigmas Z_t	% de la curva dentro de especificaciones	Partes por millón fuera de especificaciones	Índice Z_L	% de la curva dentro de especificaciones	PPM fuera de especificaciones
0.33	1	68.27	317 300	-0.5	30.23	697 700
0.67	2	95.45	45 500	0.5	69.13	308 700
1.00	3	99.73	2 700	1.5	93.32	66 807
1.33	4	99.9937	63	2.5	99.379	6 210
1.67	5	99.999943	0.57	3.5	99.9767	233
2.00	6	99.9999998	0.002	4.5	99.99966	3.4

FUENTE: Gutiérrez, H., y Román de la Vara, S. (2009). Control Estadístico de la calidad y Seis Sigma. México, D.F.; McGraw-Hill.

ANEXO 22

Tabla PARA COMBINACIONES EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL 2^k
(HASTA PARA 5 FACTORES)

FACTORES -- → EXPERIMENTOS	A	B	C	D	E
1	-	-	-	-	-
2	+	-	-	-	-
3	-	+	-	-	-
4	+	+	-	-	-
5	-	-	+	-	-
6	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-
8	+	+	+	-	-
9	-	-	-	+	-
10	+	-	-	+	-
11	-	+	-	+	-
12	+	+	-	+	-
13	-	-	+	+	-
14	+	-	+	+	-
15	-	+	+	+	-
16	+	+	+	+	-
17	-	-	-	-	+
18	+	-	-	-	+
19	-	+	-	-	+
20	+	+	-	-	+
21	-	-	+	-	+
22	+	-	+	-	+
23	-	+	+	-	+
24	+	+	+	-	+
25	-	-	-	+	+
26	+	-	-	+	+
27	-	+	-	+	+
28	+	+	-	+	+
29	-	-	+	+	+
30	+	-	+	+	+
31	-	+	+	+	+
32	+	+	+	+	+

ELABORADO POR: BOLÍVAR CÓNDOR

ANEXO 23

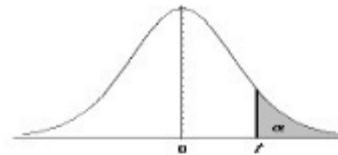
VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN CHI CUADRADO



χ²																
g.d.l	0,001	0,005	0,01	0,02	0,025	0,03	0,04	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	g.d.l
1	10,828	7,879	6,635	5,412	5,024	4,709	4,218	3,841	2,706	2,072	1,642	1,323	1,074	0,873	0,708	1
2	13,816	10,597	9,210	7,824	7,378	7,013	6,438	5,991	4,605	3,794	3,219	2,773	2,408	2,100	1,833	2
3	16,266	12,838	11,345	9,837	9,348	8,947	8,311	7,815	6,251	5,317	4,642	4,108	3,665	3,283	2,946	3
4	18,467	14,860	13,277	11,668	11,143	10,712	10,026	9,488	7,779	6,745	5,989	5,385	4,878	4,438	4,045	4
5	20,515	16,750	15,086	13,388	12,833	12,375	11,644	11,070	9,236	8,115	7,289	6,626	6,064	5,573	5,132	5
6	22,458	18,548	16,812	15,033	14,449	13,968	13,198	12,592	10,645	9,446	8,558	7,841	7,231	6,695	6,211	6
7	24,322	20,278	18,475	16,622	16,013	15,509	14,703	14,067	12,017	10,748	9,803	9,037	8,383	7,806	7,283	7
8	26,124	21,955	20,090	18,168	17,535	17,010	16,171	15,507	13,362	12,027	11,030	10,219	9,524	8,909	8,351	8
9	27,877	23,589	21,666	19,679	19,023	18,480	17,608	16,919	14,684	13,288	12,242	11,389	10,656	10,006	9,414	9
10	29,588	25,188	23,209	21,161	20,483	19,922	19,021	18,307	15,987	14,534	13,442	12,549	11,781	11,097	10,473	10
11	31,264	26,757	24,725	22,618	21,920	21,342	20,412	19,675	17,275	15,767	14,631	13,701	12,899	12,184	11,530	11
12	32,909	28,300	26,217	24,054	23,337	22,742	21,785	21,026	18,549	16,989	15,812	14,845	14,011	13,266	12,584	12
13	34,528	29,819	27,688	25,472	24,736	24,125	23,142	22,362	19,812	18,202	16,985	15,984	15,119	14,345	13,636	13
14	36,123	31,319	29,141	26,873	26,119	25,493	24,485	23,685	21,064	19,406	18,151	17,117	16,222	15,421	14,685	14
15	37,697	32,801	30,578	28,259	27,488	26,848	25,816	24,996	22,307	20,603	19,311	18,245	17,322	16,494	15,733	15
16	39,252	34,267	32,000	29,633	28,845	28,191	27,136	26,296	23,542	21,793	20,465	19,369	18,418	17,565	16,780	16
17	40,790	35,718	33,409	30,995	30,191	29,523	28,445	27,587	24,769	22,977	21,615	20,489	19,511	18,633	17,824	17
18	42,312	37,156	34,805	32,346	31,526	30,845	29,745	28,869	25,989	24,155	22,760	21,605	20,601	19,699	18,868	18
19	43,820	38,582	36,191	33,687	32,852	32,158	31,037	30,144	27,204	25,329	23,900	22,718	21,689	20,764	19,910	19
20	45,315	39,997	37,566	35,020	34,170	33,462	32,321	31,410	28,412	26,498	25,038	23,828	22,775	21,826	20,951	20
21	46,797	41,401	38,932	36,343	35,479	34,759	33,597	32,671	29,615	27,662	26,171	24,935	23,858	22,888	21,991	21
22	48,268	42,796	40,289	37,659	36,781	36,049	34,867	33,924	30,813	28,822	27,301	26,039	24,939	23,947	23,031	22
23	49,728	44,181	41,638	38,968	38,076	37,332	36,131	35,172	32,007	29,979	28,429	27,141	26,018	25,006	24,069	23
24	51,179	45,559	42,980	40,270	39,364	38,609	37,389	36,415	33,196	31,132	29,553	28,241	27,096	26,063	25,106	24
25	52,620	46,928	44,314	41,566	40,646	39,880	38,642	37,652	34,382	32,282	30,675	29,339	28,172	27,118	26,143	25
26	54,052	48,290	45,642	42,856	41,923	41,146	39,889	38,885	35,563	33,429	31,795	30,435	29,246	28,173	27,179	26
27	55,476	49,645	46,963	44,140	43,195	42,407	41,132	40,113	36,741	34,574	32,912	31,528	30,319	29,227	28,214	27
28	56,892	50,993	48,278	45,419	44,461	43,662	42,370	41,337	37,916	35,715	34,027	32,620	31,391	30,279	29,249	28
29	58,301	52,336	49,588	46,693	45,722	44,913	43,604	42,557	39,087	36,854	35,139	33,711	32,461	31,331	30,283	29
30	59,703	53,672	50,892	47,962	46,979	46,160	44,834	43,773	40,256	37,990	36,250	34,800	33,530	32,382	31,316	30
31	61,098	55,003	52,191	49,226	48,232	47,402	46,059	44,985	41,422	39,124	37,359	35,887	34,598	33,431	32,349	31
32	62,487	56,328	53,486	50,487	49,480	48,641	47,282	46,194	42,585	40,256	38,466	36,973	35,665	34,480	33,381	32
33	63,870	57,648	54,776	51,743	50,725	49,876	48,500	47,400	43,745	41,386	39,572	38,058	36,731	35,529	34,413	33
34	65,247	58,964	56,061	52,995	51,966	51,107	49,716	48,602	44,903	42,514	40,676	39,141	37,795	36,576	35,444	34
35	66,619	60,275	57,342	54,244	53,203	52,335	50,928	49,802	46,059	43,640	41,778	40,223	38,859	37,623	36,475	35
40	73,402	66,766	63,691	60,436	59,342	58,428	56,946	55,758	51,805	49,244	47,269	45,616	44,165	42,848	41,622	40
60	90,607	91,952	88,379	84,580	83,298	82,225	80,482	79,082	74,397	71,341	68,972	66,981	65,227	63,628	62,135	60
80	124,839	116,321	112,329	108,069	106,629	105,422	103,459	101,879	96,578	93,106	90,405	88,130	86,120	84,284	82,566	80
90	137,208	128,299	124,116	119,648	118,136	116,869	114,806	113,145	107,565	103,904	101,054	98,650	96,524	94,581	92,761	90
100	149,449	140,169	135,807	131,142	129,561	128,237	126,079	124,342	118,498	114,659	111,667	109,141	106,906	104,862	102,946	100
120	173,617	163,648	158,950	153,918	152,211	150,780	148,447	146,567	140,233	136,062	132,806	130,055	127,616	125,383	123,289	120
140	197,451	186,847	181,840	176,471	174,648	173,118	170,624	168,613	161,827	157,352	153,854	150,894	148,269	145,863	143,604	140
g.d.l	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	0,975	0,98	0,99	0,995	g.d.l
1	0,571	0,455	0,357	0,275	0,206	0,148	0,102	0,064	0,036	0,016	0,004	0,001	0,001	0,000	0,000	1
2	1,597	1,386	1,196	1,022	0,862	0,713	0,575	0,446	0,325	0,211	0,103	0,051	0,040	0,020	0,010	2
3	2,643	2,366	2,109	1,869	1,642	1,424	1,213	1,005	0,798	0,584	0,352	0,216	0,185	0,115	0,072	3
4	3,687	3,357	3,047	2,753	2,470	2,195	1,923	1,649	1,366	1,064	0,711	0,484	0,429	0,297	0,207	4
5	4,728	4,351	3,996	3,655	3,325	3,000	2,675	2,343	1,994	1,610	1,145	0,831	0,752	0,554	0,412	5
6	5,765	5,348	4,952	4,570	4,197	3,828	3,455	3,070	2,661	2,204	1,635	1,237	1,134	0,872	0,676	6
7	6,800	6,346	5,913	5,493	5,082	4,671	4,255	3,822	3,358	2,833	2,167	1,690	1,564	1,239	0,989	7
8	7,833	7,344	6,877	6,423	5,975	5,527	5,071	4,594	4,078	3,490	2,733	2,180	2,032	1,646	1,344	8
9	8,863	8,343	7,843	7,357	6,876	6,393	5,899	5,380	4,817	4,168	3,325	2,700	2,532	2,088	1,735	9
10	9,892	9,342	8,812	8,295	7,783	7,267	6,737	6,179	5,570	4,865	3,940	3,247	3,059	2,558	2,156	10
11	10,920	10,341	9,783	9,237	8,695	8,148	7,584	6,989	6,336	5,578	4,575	3,816	3,609	3,053	2,603	11
12	11,946	11,340	10,755	10,182	9,612	9,034	8,438	7,807	7,114	6,304	5,226	4,404	4,178	3,571	3,074	12
13	12,972	12,340	11,729	11,129	10,532	9,926	9,299	8,634	7,901	7,042	5,892	5,009	4,765	4,107	3,565	13
14	13,996	13,339	12,703	12,078	11,455	10,821	10,165	9,467	8,696	7,790	6,571	5,629	5,368	4,660	4,075	14
15	15,020	14,339	13,679	13,030	12,381	11,721	11,037	10,307	9,499	8,547	7,261	6,262	5,985	5,229	4,601	15
16	16,042	15,338	14,655	13,983	13,310	12,624	11,912	11,152	10,399	9,312	7,962	6,908	6,614	5,812	5,142	16
17																

Tabla de la t de Student.

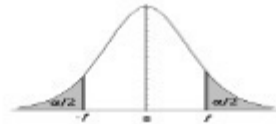
ANEXO 24 (a)



$n \setminus \alpha$	0,30	0,25	0,20	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	0,7265	1,0000	1,3764	3,0777	6,3137	12,7062	31,8210	63,6559	127,3213	318,3088	636,6192
2	0,6172	0,8165	1,0607	1,8856	2,9200	4,3027	6,9645	9,9250	14,0890	22,3271	31,5991
3	0,5844	0,7649	0,9785	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	7,4533	10,2145	12,9240
4	0,5688	0,7407	0,9410	1,5332	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041	5,5976	7,1732	8,6103
5	0,5594	0,7267	0,9195	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	4,7733	5,8934	6,8688
6	0,5534	0,7176	0,9057	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	4,3168	5,2076	5,9588
7	0,5491	0,7111	0,8960	1,4149	1,8946	2,3646	2,9979	3,4995	4,0293	4,7853	5,4079
8	0,5459	0,7064	0,8889	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554	3,8325	4,5008	5,0413
9	0,5435	0,7027	0,8834	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	3,6897	4,2968	4,7809
10	0,5415	0,6998	0,8791	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	3,5814	4,1437	4,5869
11	0,5399	0,6974	0,8755	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	3,4966	4,0247	4,4370
12	0,5386	0,6955	0,8726	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	3,4284	3,9296	4,3178
13	0,5375	0,6938	0,8702	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	3,3725	3,8520	4,2208
14	0,5366	0,6924	0,8681	1,3460	1,7613	2,1448	2,6246	2,9768	3,3257	3,7874	4,1405
15	0,5357	0,6912	0,8662	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	3,2860	3,7328	4,0728
16	0,5350	0,6901	0,8647	1,3368	1,7469	2,1199	2,5835	2,9208	3,2520	3,6862	4,0150
17	0,5344	0,6892	0,8633	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,2224	3,6468	3,9651
18	0,5338	0,6884	0,8620	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,1966	3,6105	3,9216
19	0,5333	0,6876	0,8610	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	3,1737	3,5794	3,8834
20	0,5329	0,6870	0,8600	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453	3,1534	3,5518	3,8495
21	0,5325	0,6864	0,8591	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,1352	3,5272	3,8193
22	0,5321	0,6858	0,8583	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,1188	3,5050	3,7921
23	0,5317	0,6853	0,8575	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,1040	3,4850	3,7676
24	0,5314	0,6848	0,8569	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7970	3,0905	3,4668	3,7454
25	0,5312	0,6844	0,8562	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	3,0782	3,4502	3,7251
26	0,5309	0,6840	0,8557	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787	3,0669	3,4350	3,7066
27	0,5306	0,6837	0,8551	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	3,0565	3,4210	3,6896
28	0,5304	0,6834	0,8546	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	3,0469	3,4082	3,6739
29	0,5302	0,6830	0,8542	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564	3,0380	3,3962	3,6594
30	0,5300	0,6828	0,8538	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500	3,0298	3,3852	3,6460
40	0,5286	0,6807	0,8507	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	2,9712	3,3069	3,5510
60	0,5265	0,6776	0,8461	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	2,8870	3,1953	3,4163
120	0,5258	0,6765	0,8446	1,2886	1,6576	1,9799	2,3578	2,6174	2,8599	3,1595	3,3735
∞	0,5244	0,6746	0,8416	1,2816	1,6449	1,9600	2,3263	2,5758	2,8070	3,0902	3,2905

Tabla de la t de Student.

ANEXO 24 (b)



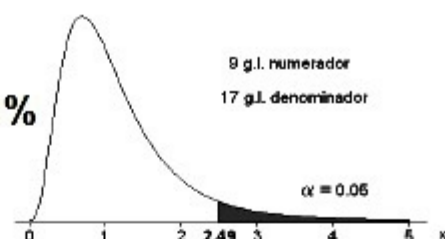
$n \setminus \alpha$	0,90	0,80	0,70	0,50	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,1584	0,3249	0,5095	1,0000	1,9626	3,0777	6,3137	12,7062	31,8210	63,6559	636,5776
2	0,1421	0,2887	0,4447	0,8165	1,3862	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9250	31,5998
3	0,1366	0,2767	0,4242	0,7649	1,2498	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8408	12,9244
4	0,1338	0,2707	0,4142	0,7407	1,1896	1,5332	2,1318	2,7765	3,7469	4,6041	8,6101
5	0,1322	0,2672	0,4082	0,7267	1,1558	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	6,8685
6	0,1311	0,2648	0,4043	0,7176	1,1342	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	5,9587
7	0,1303	0,2632	0,4015	0,7111	1,1192	1,4149	1,8946	2,3646	2,9979	3,4995	5,4081
8	0,1297	0,2619	0,3995	0,7064	1,1081	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554	5,0414
9	0,1293	0,2610	0,3979	0,7027	1,0997	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	4,7809
10	0,1289	0,2602	0,3966	0,6998	1,0931	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	4,5868
11	0,1286	0,2596	0,3956	0,6974	1,0877	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	4,4369
12	0,1283	0,2590	0,3947	0,6955	1,0832	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0546	4,3178
13	0,1281	0,2586	0,3940	0,6938	1,0795	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	4,2209
14	0,1280	0,2582	0,3933	0,6924	1,0763	1,3450	1,7613	2,1448	2,6246	2,9768	4,1403
15	0,1278	0,2579	0,3928	0,6912	1,0735	1,3406	1,7531	2,1315	2,6025	2,9467	4,0728
16	0,1277	0,2576	0,3923	0,6901	1,0711	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	4,0149
17	0,1276	0,2573	0,3919	0,6892	1,0690	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,9651
18	0,1274	0,2571	0,3915	0,6884	1,0672	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,9217
19	0,1274	0,2569	0,3912	0,6876	1,0655	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	3,8833
20	0,1273	0,2567	0,3909	0,6870	1,0640	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453	3,8496
21	0,1272	0,2566	0,3906	0,6864	1,0627	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,8193
22	0,1271	0,2564	0,3904	0,6858	1,0614	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,7922
23	0,1271	0,2563	0,3902	0,6853	1,0603	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,7676
24	0,1270	0,2562	0,3900	0,6848	1,0593	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7970	3,7454
25	0,1269	0,2561	0,3898	0,6844	1,0584	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	3,7251
26	0,1269	0,2560	0,3896	0,6840	1,0575	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787	3,7067
27	0,1268	0,2559	0,3894	0,6837	1,0567	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	3,6895
28	0,1268	0,2558	0,3893	0,6834	1,0560	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	3,6739
29	0,1268	0,2557	0,3892	0,6830	1,0553	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564	3,6595
30	0,1267	0,2556	0,3890	0,6828	1,0547	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500	3,6460
40	0,1265	0,2550	0,3881	0,6807	1,0500	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	3,5510
60	0,1261	0,2542	0,3867	0,6776	1,0432	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	3,4164
120	0,1259	0,2539	0,3862	0,6765	1,0409	1,2886	1,6576	1,9799	2,3578	2,6174	3,3734
∞	0,125	0,253	0,385	0,674	1,036	1,282	1,645	1,96	2,326	2,576	3,291

ANEXO 25 (a)

TABLA F - SIGNIFICANCIA = 5 %

$$\alpha = 0.05$$

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F



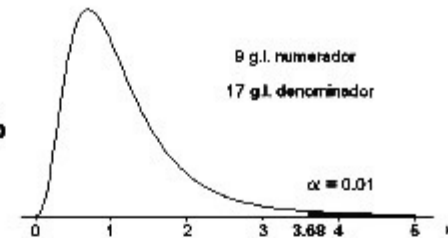
Grados de libertad del denominador	Grados de libertad del numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	120	240	1000
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.90	245.95	248.02	249.26	250.10	251.14	252.20	253.25	253.79	254.19
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.46	19.46	19.47	19.48	19.49	19.49	19.49
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.57	8.55	8.54	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.64	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.43	4.40	4.38	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.74	3.70	3.69	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.30	3.27	3.25	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.01	2.97	2.95	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.79	2.75	2.73	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.62	2.58	2.56	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.49	2.45	2.43	2.41
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.38	2.34	2.32	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.30	2.25	2.23	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.22	2.18	2.15	2.14
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.16	2.11	2.09	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.11	2.06	2.03	2.02
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.06	2.01	1.99	1.97
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.02	1.97	1.94	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.90	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.95	1.90	1.87	1.85
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.84	1.82
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.89	1.84	1.81	1.79
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.86	1.81	1.79	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.84	1.79	1.76	1.74
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.74	1.72
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.80	1.75	1.72	1.70
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.79	1.73	1.70	1.68
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.68	1.66
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.75	1.70	1.67	1.65
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.74	1.68	1.65	1.63
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.64	1.58	1.54	1.52
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.87	1.78	1.73	1.69	1.63	1.58	1.51	1.48	1.45
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.69	1.65	1.59	1.53	1.47	1.43	1.40
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.79	1.70	1.64	1.60	1.54	1.48	1.41	1.37	1.34
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.77	1.68	1.62	1.57	1.52	1.45	1.38	1.33	1.30
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.60	1.55	1.50	1.43	1.35	1.31	1.27
1000	3.85	3.00	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84	1.76	1.68	1.58	1.52	1.47	1.41	1.33	1.24	1.18	1.11

ANEXO 25 (b)

TABLA F - SIGNIFICANCIA = 1 %

$$\alpha = 0.01$$

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F



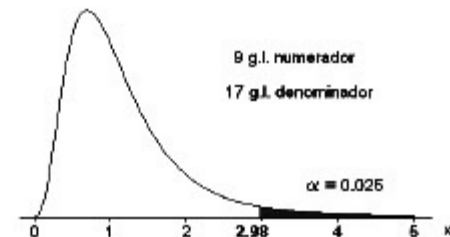
Grados de libertad del denominador	Grados de libertad del numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	120	240	1000
1	4052.18	4999.34	5403.53	5624.26	5763.96	5858.95	5928.33	5980.95	6022.40	6055.93	6106.68	6156.97	6208.66	6239.86	6260.35	6286.43	6312.97	6339.51	6352.55	6362.80
2	98.50	99.00	99.16	99.25	99.30	99.33	99.36	99.38	99.39	99.40	99.42	99.43	99.45	99.46	99.47	99.48	99.48	99.49	99.50	99.50
3	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.34	27.23	27.05	26.87	26.69	26.58	26.50	26.41	26.32	26.22	26.17	26.14
4	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.55	14.37	14.20	14.02	13.91	13.84	13.75	13.65	13.56	13.51	13.47
5	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.46	10.29	10.16	10.06	9.89	9.72	9.55	9.45	9.38	9.29	9.20	9.11	9.07	9.03
6	13.75	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.72	7.56	7.40	7.30	7.23	7.14	7.06	6.97	6.92	6.89
7	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	6.99	6.84	6.72	6.62	6.47	6.31	6.16	6.06	5.99	5.91	5.82	5.74	5.69	5.66
8	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.18	6.03	5.91	5.81	5.67	5.52	5.36	5.26	5.20	5.12	5.03	4.95	4.90	4.87
9	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.61	5.47	5.35	5.26	5.11	4.96	4.81	4.71	4.65	4.57	4.48	4.40	4.35	4.32
10	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.20	5.06	4.94	4.85	4.71	4.56	4.41	4.31	4.25	4.17	4.08	4.00	3.95	3.92
11	9.65	7.21	6.22	5.67	5.32	5.07	4.89	4.74	4.63	4.54	4.40	4.25	4.10	4.01	3.94	3.86	3.78	3.69	3.65	3.61
12	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.64	4.50	4.39	4.30	4.16	4.01	3.86	3.76	3.70	3.62	3.54	3.45	3.41	3.37
13	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.57	3.51	3.43	3.34	3.25	3.21	3.18
14	8.86	6.51	5.56	5.04	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.80	3.66	3.51	3.41	3.35	3.27	3.18	3.09	3.05	3.02
15	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.67	3.52	3.37	3.28	3.21	3.13	3.05	2.96	2.91	2.88
16	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.55	3.41	3.26	3.16	3.10	3.02	2.93	2.84	2.80	2.76
17	8.40	6.11	5.19	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.46	3.31	3.16	3.07	3.00	2.92	2.83	2.75	2.70	2.66
18	8.29	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.84	3.71	3.60	3.51	3.37	3.23	3.08	2.98	2.92	2.84	2.75	2.66	2.61	2.58
19	8.18	5.93	5.01	4.50	4.17	3.94	3.77	3.63	3.52	3.43	3.30	3.15	3.00	2.91	2.84	2.76	2.67	2.58	2.54	2.50
20	8.10	5.85	4.94	4.43	4.10	3.87	3.70	3.56	3.46	3.37	3.23	3.09	2.94	2.84	2.78	2.69	2.61	2.52	2.47	2.43
21	8.02	5.78	4.87	4.37	4.04	3.81	3.64	3.51	3.40	3.31	3.17	3.03	2.88	2.79	2.72	2.64	2.55	2.46	2.41	2.37
22	7.95	5.72	4.82	4.31	3.99	3.76	3.59	3.45	3.35	3.26	3.12	2.98	2.83	2.73	2.67	2.58	2.50	2.40	2.35	2.32
23	7.88	5.66	4.76	4.26	3.94	3.71	3.54	3.41	3.30	3.21	3.07	2.93	2.78	2.69	2.62	2.54	2.45	2.35	2.31	2.27
24	7.82	5.61	4.72	4.22	3.90	3.67	3.50	3.36	3.26	3.17	3.03	2.89	2.74	2.64	2.58	2.49	2.40	2.31	2.26	2.22
25	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.60	2.54	2.45	2.36	2.27	2.22	2.18
26	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.57	2.50	2.42	2.33	2.23	2.18	2.14
27	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.54	2.47	2.38	2.29	2.20	2.15	2.11
28	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.75	2.60	2.51	2.44	2.35	2.26	2.17	2.12	2.08
29	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.87	2.73	2.57	2.48	2.41	2.33	2.23	2.14	2.09	2.05
30	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.45	2.39	2.30	2.21	2.11	2.06	2.02
40	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.27	2.20	2.11	2.02	1.92	1.86	1.82
50	7.17	5.06	4.20	3.72	3.41	3.19	3.02	2.89	2.78	2.70	2.56	2.42	2.27	2.17	2.10	2.01	1.91	1.80	1.74	1.70
60	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.10	2.03	1.94	1.84	1.73	1.67	1.62
80	6.96	4.88	4.04	3.56	3.26	3.04	2.87	2.74	2.64	2.55	2.42	2.27	2.12	2.01	1.94	1.85	1.75	1.63	1.57	1.51
100	6.90	4.82	3.98	3.51	3.21	2.99	2.82	2.69	2.59	2.50	2.37	2.22	2.07	1.97	1.89	1.80	1.69	1.57	1.50	1.45
120	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.93	1.86	1.76	1.66	1.53	1.46	1.40
1000	6.66	4.63	3.80	3.34	3.04	2.82	2.66	2.53	2.43	2.34	2.20	2.06	1.90	1.79	1.72	1.61	1.50	1.35	1.26	1.16

ANEXO 25 (c)

TABLA F - SIGNIFICANCIA = 2,5%

$$\alpha = 0.025$$

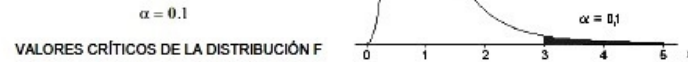
VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F



Grados de libertad del denominador	Grados de libertad del numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	120	240	1000
1	647.79	799.48	864.15	899.60	921.83	937.11	948.20	956.64	963.28	968.63	976.72	984.87	993.08	998.09	1001.40	1005.60	1009.79	1014.04	1016.13	1017.76
2	38.51	39.00	39.17	39.25	39.30	39.33	39.36	39.37	39.39	39.40	39.41	39.43	39.45	39.46	39.46	39.47	39.48	39.49	39.49	39.50
3	17.44	16.04	15.44	15.10	14.88	14.73	14.62	14.54	14.47	14.42	14.34	14.25	14.17	14.12	14.08	14.04	13.99	13.95	13.92	13.91
4	12.22	10.65	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.90	8.84	8.75	8.66	8.56	8.50	8.46	8.41	8.36	8.31	8.28	8.26
5	10.01	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.27	6.23	6.18	6.12	6.07	6.04	6.02
6	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.11	5.07	5.01	4.96	4.90	4.88	4.86
7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.40	4.36	4.31	4.25	4.20	4.17	4.15
8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.20	4.10	4.00	3.94	3.89	3.84	3.78	3.73	3.70	3.68
9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.60	3.56	3.51	3.45	3.39	3.36	3.34
10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.35	3.31	3.26	3.20	3.14	3.11	3.09
11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.16	3.12	3.06	3.00	2.94	2.91	2.89
12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.01	2.96	2.91	2.85	2.79	2.76	2.73
13	6.41	4.97	4.35	4.00	3.77	3.60	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.88	2.84	2.78	2.72	2.66	2.63	2.60
14	6.30	4.86	4.24	3.89	3.66	3.50	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.78	2.73	2.67	2.61	2.55	2.52	2.50
15	6.20	4.77	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.69	2.64	2.59	2.52	2.46	2.43	2.40
16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.50	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.61	2.57	2.51	2.45	2.38	2.35	2.32
17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.55	2.50	2.44	2.38	2.32	2.28	2.26
18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.10	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.49	2.44	2.38	2.32	2.26	2.22	2.20
19	5.92	4.51	3.90	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.44	2.39	2.33	2.27	2.20	2.17	2.14
20	5.87	4.46	3.86	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.40	2.35	2.29	2.22	2.16	2.12	2.09
21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.80	2.73	2.64	2.53	2.42	2.36	2.31	2.25	2.18	2.11	2.08	2.05
22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.70	2.60	2.50	2.39	2.32	2.27	2.21	2.14	2.08	2.04	2.01
23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.90	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.29	2.24	2.18	2.11	2.04	2.01	1.98
24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.70	2.64	2.54	2.44	2.33	2.26	2.21	2.15	2.08	2.01	1.97	1.94
25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.30	2.23	2.18	2.12	2.05	1.98	1.94	1.91
26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.10	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.21	2.16	2.09	2.03	1.95	1.92	1.89
27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.80	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.18	2.13	2.07	2.00	1.93	1.89	1.86
28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.90	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.16	2.11	2.05	1.98	1.91	1.87	1.84
29	5.59	4.20	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.14	2.09	2.03	1.96	1.89	1.85	1.82
30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.20	2.12	2.07	2.01	1.94	1.87	1.83	1.80
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	1.99	1.94	1.88	1.80	1.72	1.68	1.65
50	5.34	3.97	3.39	3.05	2.83	2.67	2.55	2.46	2.38	2.32	2.22	2.11	1.99	1.92	1.87	1.80	1.72	1.64	1.59	1.56
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.87	1.82	1.74	1.67	1.58	1.53	1.49
80	5.22	3.86	3.28	2.95	2.73	2.57	2.45	2.35	2.28	2.21	2.11	2.00	1.88	1.81	1.75	1.68	1.60	1.51	1.46	1.41
100	5.18	3.83	3.25	2.92	2.70	2.54	2.42	2.32	2.24	2.18	2.08	1.97	1.85	1.77	1.71	1.64	1.56	1.46	1.41	1.36
120	5.15	3.80	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.75	1.69	1.61	1.53	1.43	1.38	1.33
1000	5.04	3.70	3.13	2.80	2.58	2.42	2.30	2.20	2.13	2.06	1.96	1.85	1.72	1.64	1.58	1.50	1.41	1.29	1.21	1.13

ANEXO 25 (d)

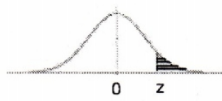
TABLA F - SIGNIFICANCIA = 10%



Grados de libertad del denominador	Grados de libertad del numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	
1	39,86	49,50	53,59	55,83	57,24	58,20	58,91	59,44	59,86	60,19	60,71	61,22	61,74	62,00	62,26	62,53	62,79	63,06	63,33	
2	8,53	9,00	9,16	9,24	9,29	9,33	9,35	9,37	9,38	9,39	9,41	9,42	9,44	9,45	9,46	9,47	9,47	9,48	9,49	
3	5,54	5,46	5,39	5,34	5,31	5,28	5,27	5,25	5,24	5,23	5,22	5,20	5,18	5,17	5,17	5,16	5,15	5,14	5,13	
4	4,54	4,32	4,19	4,11	4,05	4,01	3,98	3,95	3,94	3,92	3,90	3,87	3,84	3,83	3,82	3,80	3,79	3,78	3,76	
5	4,06	3,78	3,62	3,52	3,45	3,40	3,37	3,34	3,32	3,30	3,27	3,24	3,21	3,19	3,17	3,16	3,14	3,12	3,10	
6	3,78	3,46	3,29	3,18	3,11	3,05	3,01	2,98	2,96	2,94	2,90	2,87	2,84	2,82	2,80	2,78	2,76	2,74	2,72	
7	3,59	3,26	3,07	2,96	2,88	2,83	2,78	2,75	2,72	2,70	2,67	2,63	2,59	2,58	2,56	2,54	2,51	2,49	2,47	
8	3,46	3,11	2,92	2,81	2,73	2,67	2,62	2,59	2,56	2,54	2,50	2,46	2,42	2,40	2,38	2,36	2,34	2,32	2,29	
9	3,36	3,01	2,81	2,69	2,61	2,55	2,51	2,47	2,44	2,42	2,38	2,34	2,30	2,28	2,25	2,23	2,21	2,18	2,16	
10	3,29	2,92	2,73	2,61	2,52	2,46	2,41	2,38	2,35	2,32	2,28	2,24	2,20	2,18	2,16	2,13	2,11	2,08	2,06	
11	3,23	2,86	2,66	2,54	2,45	2,39	2,34	2,30	2,27	2,25	2,21	2,17	2,12	2,10	2,08	2,05	2,03	2,00	1,97	
12	3,18	2,81	2,61	2,48	2,39	2,33	2,28	2,24	2,21	2,19	2,15	2,10	2,06	2,04	2,01	1,99	1,96	1,93	1,90	
13	3,14	2,76	2,56	2,43	2,35	2,28	2,23	2,20	2,16	2,14	2,10	2,05	2,01	1,98	1,96	1,93	1,90	1,88	1,85	
14	3,10	2,73	2,52	2,39	2,31	2,24	2,19	2,15	2,12	2,10	2,05	2,01	1,96	1,94	1,91	1,89	1,86	1,83	1,80	
15	3,07	2,70	2,49	2,36	2,27	2,21	2,16	2,12	2,09	2,06	2,02	1,97	1,92	1,90	1,87	1,85	1,82	1,79	1,76	
16	3,05	2,67	2,46	2,33	2,24	2,18	2,13	2,09	2,06	2,03	1,99	1,94	1,89	1,87	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72	
17	3,03	2,64	2,44	2,31	2,22	2,15	2,10	2,06	2,03	2,00	1,96	1,91	1,86	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72	1,69	
18	3,01	2,62	2,42	2,29	2,20	2,13	2,08	2,04	2,00	1,98	1,93	1,89	1,84	1,81	1,78	1,75	1,72	1,69	1,66	
19	2,99	2,61	2,40	2,27	2,18	2,11	2,06	2,02	1,98	1,96	1,91	1,86	1,81	1,79	1,76	1,73	1,70	1,67	1,63	
20	2,97	2,59	2,38	2,25	2,16	2,09	2,04	2,00	1,96	1,94	1,89	1,84	1,79	1,77	1,74	1,71	1,68	1,64	1,61	
21	2,96	2,57	2,36	2,23	2,14	2,08	2,02	1,98	1,95	1,92	1,87	1,83	1,78	1,75	1,72	1,69	1,66	1,62	1,59	
22	2,95	2,56	2,35	2,22	2,13	2,06	2,01	1,97	1,93	1,90	1,86	1,81	1,76	1,73	1,70	1,67	1,64	1,60	1,57	
23	2,94	2,55	2,34	2,21	2,11	2,05	1,99	1,95	1,92	1,89	1,84	1,80	1,74	1,72	1,69	1,66	1,62	1,59	1,55	
24	2,93	2,54	2,33	2,19	2,10	2,04	1,98	1,94	1,91	1,88	1,83	1,78	1,73	1,70	1,67	1,64	1,61	1,57	1,53	
25	2,92	2,53	2,32	2,18	2,09	2,02	1,97	1,93	1,89	1,87	1,82	1,77	1,72	1,69	1,66	1,63	1,59	1,56	1,52	
26	2,91	2,52	2,31	2,17	2,08	2,01	1,96	1,92	1,88	1,86	1,81	1,76	1,71	1,68	1,65	1,61	1,58	1,54	1,50	
27	2,90	2,51	2,30	2,17	2,07	2,00	1,95	1,91	1,87	1,85	1,80	1,75	1,70	1,67	1,64	1,60	1,57	1,53	1,49	
28	2,89	2,50	2,29	2,16	2,06	2,00	1,94	1,90	1,87	1,84	1,79	1,74	1,69	1,66	1,63	1,59	1,56	1,52	1,48	
29	2,89	2,50	2,28	2,15	2,06	1,99	1,93	1,89	1,86	1,83	1,78	1,73	1,68	1,65	1,62	1,58	1,55	1,51	1,47	
30	2,88	2,49	2,28	2,14	2,05	1,98	1,93	1,88	1,85	1,82	1,77	1,72	1,67	1,64	1,61	1,57	1,54	1,50	1,46	
40	2,84	2,44	2,23	2,09	2,00	1,93	1,87	1,83	1,79	1,76	1,71	1,66	1,61	1,57	1,54	1,51	1,47	1,42	1,38	
60	2,79	2,39	2,18	2,04	1,95	1,87	1,82	1,77	1,74	1,71	1,66	1,60	1,54	1,51	1,48	1,44	1,40	1,35	1,29	
120	2,75	2,35	2,13	1,99	1,90	1,82	1,77	1,72	1,68	1,65	1,60	1,55	1,48	1,45	1,41	1,37	1,32	1,26	1,19	
∞	2,71	2,30	2,08	1,94	1,85	1,77	1,72	1,67	1,63	1,60	1,55	1,49	1,42	1,38	1,34	1,30	1,24	1,17	1,00	

ANEXO 26 (a)

ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL ESTÁNDAR



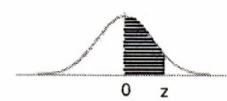
c.chica (z)



c.grande (z)



área central



área (0 a z)

z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)	z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)
0,00	0,50000	0,50000	0,00000	0,00000	0,50	0,30854	0,69146	0,38292	0,19146
0,01	0,49601	0,50399	0,00798	0,00399	0,51	0,30503	0,69497	0,38995	0,19497
0,02	0,49202	0,50798	0,01596	0,00798	0,52	0,30153	0,69847	0,39694	0,19847
0,03	0,48803	0,51197	0,02393	0,01197	0,53	0,29806	0,70194	0,40389	0,20194
0,04	0,48405	0,51595	0,03191	0,01595	0,54	0,29460	0,70540	0,41080	0,20540
0,05	0,48006	0,51994	0,03988	0,01994	0,55	0,29116	0,70884	0,41768	0,20884
0,06	0,47608	0,52392	0,04784	0,02392	0,56	0,28774	0,71226	0,42452	0,21226
0,07	0,47210	0,52790	0,05581	0,02790	0,57	0,28434	0,71566	0,43132	0,21566
0,08	0,46812	0,53188	0,06376	0,03188	0,58	0,28096	0,71904	0,43809	0,21904
0,09	0,46414	0,53586	0,07171	0,03586	0,59	0,27760	0,72240	0,44481	0,22240
0,10	0,46017	0,53983	0,07966	0,03983	0,60	0,27425	0,72575	0,45149	0,22575
0,11	0,45620	0,54380	0,08759	0,04380	0,61	0,27093	0,72907	0,45814	0,22907
0,12	0,45224	0,54776	0,09552	0,04776	0,62	0,26763	0,73237	0,46474	0,23237
0,13	0,44828	0,55172	0,10343	0,05172	0,63	0,26435	0,73565	0,47131	0,23565
0,14	0,44433	0,55567	0,11134	0,05567	0,64	0,26109	0,73891	0,47783	0,23891
0,15	0,44038	0,55962	0,11924	0,05962	0,65	0,25785	0,74215	0,48431	0,24215
0,16	0,43644	0,56356	0,12712	0,06356	0,66	0,25463	0,74537	0,49075	0,24537
0,17	0,43251	0,56749	0,13499	0,06749	0,67	0,25143	0,74857	0,49714	0,24857
0,18	0,42858	0,57142	0,14285	0,07142	0,68	0,24825	0,75175	0,50350	0,25175
0,19	0,42465	0,57535	0,15069	0,07535	0,69	0,24510	0,75490	0,50981	0,25490
0,20	0,42074	0,57926	0,15852	0,07926	0,70	0,24196	0,75804	0,51607	0,25804
0,21	0,41683	0,58317	0,16633	0,08317	0,71	0,23885	0,76115	0,52230	0,26115
0,22	0,41294	0,58706	0,17413	0,08706	0,72	0,23576	0,76424	0,52848	0,26424
0,23	0,40905	0,59095	0,18191	0,09095	0,73	0,23270	0,76730	0,53461	0,26730
0,24	0,40517	0,59483	0,18967	0,09483	0,74	0,22965	0,77035	0,54070	0,27035
0,25	0,40129	0,59871	0,19741	0,09871	0,75	0,22663	0,77337	0,54675	0,27337
0,26	0,39743	0,60257	0,20514	0,10257	0,76	0,22363	0,77637	0,55275	0,27637
0,27	0,39358	0,60642	0,21284	0,10642	0,77	0,22065	0,77935	0,55870	0,27935
0,28	0,38974	0,61026	0,22052	0,11026	0,78	0,21770	0,78230	0,56461	0,28230
0,29	0,38591	0,61409	0,22818	0,11409	0,79	0,21476	0,78524	0,57047	0,28524
0,30	0,38209	0,61791	0,23582	0,11791	0,80	0,21186	0,78814	0,57629	0,28814
0,31	0,37828	0,62172	0,24344	0,12172	0,81	0,20897	0,79103	0,58206	0,29103
0,32	0,37448	0,62552	0,25103	0,12552	0,82	0,20611	0,79389	0,58778	0,29389
0,33	0,37070	0,62930	0,25860	0,12930	0,83	0,20327	0,79673	0,59346	0,29673
0,34	0,36693	0,63307	0,26614	0,13307	0,84	0,20045	0,79955	0,59909	0,29955
0,35	0,36317	0,63683	0,27366	0,13683	0,85	0,19766	0,80234	0,60467	0,30234
0,36	0,35942	0,64058	0,28115	0,14058	0,86	0,19489	0,80511	0,61021	0,30511
0,37	0,35569	0,64431	0,28862	0,14431	0,87	0,19215	0,80785	0,61570	0,30785
0,38	0,35197	0,64803	0,29605	0,14803	0,88	0,18943	0,81057	0,62114	0,31057
0,39	0,34827	0,65173	0,30346	0,15173	0,89	0,18673	0,81327	0,62653	0,31327
0,40	0,34458	0,65542	0,31084	0,15542	0,90	0,18406	0,81594	0,63188	0,31594
0,41	0,34090	0,65910	0,31819	0,15910	0,91	0,18141	0,81859	0,63718	0,31859
0,42	0,33724	0,66276	0,32551	0,16276	0,92	0,17879	0,82121	0,64243	0,32121
0,43	0,33360	0,66640	0,33280	0,16640	0,93	0,17619	0,82381	0,64763	0,32381
0,44	0,32997	0,67003	0,34006	0,17003	0,94	0,17361	0,82639	0,65278	0,32639
0,45	0,32636	0,67364	0,34729	0,17364	0,95	0,17106	0,82894	0,65789	0,32894
0,46	0,32276	0,67724	0,35448	0,17724	0,96	0,16853	0,83147	0,66294	0,33147
0,47	0,31918	0,68082	0,36164	0,18082	0,97	0,16602	0,83398	0,66795	0,33398
0,48	0,31561	0,68439	0,36877	0,18439	0,98	0,16354	0,83646	0,67291	0,33646
0,49	0,31207	0,68793	0,37587	0,18793	0,99	0,16109	0,83891	0,67783	0,33891

ANEXO 26 (b)

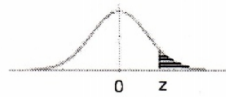
ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL ESTÁNDAR



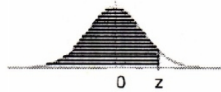
z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)	z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)
1,00	0,15866	0,84134	0,68269	0,34134	1,50	0,06681	0,93319	0,86639	0,43319
1,01	0,15625	0,84375	0,68750	0,34375	1,51	0,06552	0,93448	0,86896	0,43448
1,02	0,15386	0,84614	0,69227	0,34614	1,52	0,06426	0,93574	0,87149	0,43574
1,03	0,15151	0,84849	0,69699	0,34849	1,53	0,06301	0,93699	0,87398	0,43699
1,04	0,14917	0,85083	0,70166	0,35083	1,54	0,06178	0,93822	0,87644	0,43822
1,05	0,14686	0,85314	0,70628	0,35314	1,55	0,06057	0,93943	0,87886	0,43943
1,06	0,14457	0,85543	0,71086	0,35543	1,56	0,05938	0,94062	0,88124	0,44062
1,07	0,14231	0,85769	0,71538	0,35769	1,57	0,05821	0,94179	0,88358	0,44179
1,08	0,14007	0,85993	0,71986	0,35993	1,58	0,05705	0,94295	0,88589	0,44295
1,09	0,13786	0,86214	0,72429	0,36214	1,59	0,05592	0,94408	0,88817	0,44408
1,10	0,13567	0,86433	0,72867	0,36433	1,60	0,05480	0,94520	0,89040	0,44520
1,11	0,13350	0,86650	0,73300	0,36650	1,61	0,05370	0,94630	0,89260	0,44630
1,12	0,13136	0,86864	0,73729	0,36864	1,62	0,05262	0,94738	0,89477	0,44738
1,13	0,12924	0,87076	0,74152	0,37076	1,63	0,05155	0,94845	0,89690	0,44845
1,14	0,12714	0,87286	0,74571	0,37286	1,64	0,05050	0,94950	0,89899	0,44950
1,15	0,12507	0,87493	0,74986	0,37493	1,65	0,04947	0,95053	0,90106	0,45053
1,16	0,12302	0,87698	0,75395	0,37698	1,66	0,04846	0,95154	0,90309	0,45154
1,17	0,12100	0,87900	0,75800	0,37900	1,67	0,04746	0,95254	0,90508	0,45254
1,18	0,11900	0,88100	0,76200	0,38100	1,68	0,04648	0,95352	0,90704	0,45352
1,19	0,11702	0,88298	0,76595	0,38298	1,69	0,04551	0,95449	0,90897	0,45449
1,20	0,11507	0,88493	0,76986	0,38493	1,70	0,04457	0,95543	0,91087	0,45543
1,21	0,11314	0,88686	0,77372	0,38686	1,71	0,04363	0,95637	0,91273	0,45637
1,22	0,11123	0,88877	0,77754	0,38877	1,72	0,04272	0,95728	0,91457	0,45728
1,23	0,10935	0,89065	0,78130	0,39065	1,73	0,04182	0,95818	0,91637	0,45818
1,24	0,10749	0,89251	0,78502	0,39251	1,74	0,04093	0,95907	0,91814	0,45907
1,25	0,10565	0,89435	0,78870	0,39435	1,75	0,04006	0,95994	0,91988	0,45994
1,26	0,10383	0,89617	0,79233	0,39617	1,76	0,03920	0,96080	0,92159	0,46080
1,27	0,10204	0,89796	0,79592	0,39796	1,77	0,03836	0,96164	0,92327	0,46164
1,28	0,10027	0,89973	0,79945	0,39973	1,78	0,03754	0,96246	0,92492	0,46246
1,29	0,09853	0,90147	0,80295	0,40147	1,79	0,03673	0,96327	0,92655	0,46327
1,30	0,09680	0,90320	0,80640	0,40320	1,80	0,03593	0,96407	0,92814	0,46407
1,31	0,09510	0,90490	0,80980	0,40490	1,81	0,03515	0,96485	0,92970	0,46485
1,32	0,09342	0,90658	0,81316	0,40658	1,82	0,03438	0,96562	0,93124	0,46562
1,33	0,09176	0,90824	0,81648	0,40824	1,83	0,03362	0,96638	0,93275	0,46638
1,34	0,09012	0,90988	0,81975	0,40988	1,84	0,03288	0,96712	0,93423	0,46712
1,35	0,08851	0,91149	0,82298	0,41149	1,85	0,03216	0,96784	0,93569	0,46784
1,36	0,08691	0,91309	0,82617	0,41309	1,86	0,03144	0,96856	0,93711	0,46856
1,37	0,08534	0,91466	0,82931	0,41466	1,87	0,03074	0,96926	0,93852	0,46926
1,38	0,08379	0,91621	0,83241	0,41621	1,88	0,03005	0,96995	0,93989	0,46995
1,39	0,08226	0,91774	0,83547	0,41774	1,89	0,02938	0,97062	0,94124	0,47062
1,40	0,08076	0,91924	0,83849	0,41924	1,90	0,02872	0,97128	0,94257	0,47128
1,41	0,07927	0,92073	0,84146	0,42073	1,91	0,02807	0,97193	0,94387	0,47193
1,42	0,07780	0,92220	0,84439	0,42220	1,92	0,02743	0,97257	0,94514	0,47257
1,43	0,07636	0,92364	0,84728	0,42364	1,93	0,02680	0,97320	0,94639	0,47320
1,44	0,07493	0,92507	0,85013	0,42507	1,94	0,02619	0,97381	0,94762	0,47381
1,45	0,07353	0,92647	0,85294	0,42647	1,95	0,02559	0,97441	0,94882	0,47441
1,46	0,07215	0,92785	0,85571	0,42785	1,96	0,02500	0,97500	0,95000	0,47500
1,47	0,07078	0,92922	0,85844	0,42922	1,97	0,02442	0,97558	0,95116	0,47558
1,48	0,06944	0,93056	0,86113	0,43056	1,98	0,02385	0,97615	0,95230	0,47615
1,49	0,06811	0,93189	0,86378	0,43189	1,99	0,02330	0,97670	0,95341	0,47670

ANEXO 26 (c)

ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL ESTÁNDAR



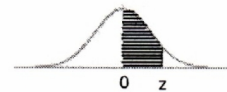
c.chica (z)



c.grande (z)



área central

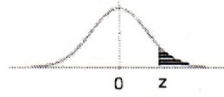


área (0 a z)

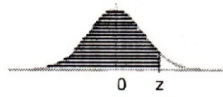
z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)	z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)
2,00	0,02275	0,97725	0,95450	0,47725	2,50	0,00621	0,99379	0,98758	0,49379
2,01	0,02222	0,97778	0,95557	0,47778	2,51	0,00604	0,99396	0,98793	0,49396
2,02	0,02169	0,97831	0,95662	0,47831	2,52	0,00587	0,99413	0,98826	0,49413
2,03	0,02118	0,97882	0,95764	0,47882	2,53	0,00570	0,99430	0,98859	0,49430
2,04	0,02068	0,97932	0,95865	0,47932	2,54	0,00554	0,99446	0,98891	0,49446
2,05	0,02018	0,97982	0,95964	0,47982	2,55	0,00539	0,99461	0,98923	0,49461
2,06	0,01970	0,98030	0,96060	0,48030	2,56	0,00523	0,99477	0,98953	0,49477
2,07	0,01923	0,98077	0,96155	0,48077	2,57	0,00508	0,99492	0,98983	0,49492
2,08	0,01876	0,98124	0,96247	0,48124	2,58	0,00494	0,99506	0,99012	0,49506
2,09	0,01831	0,98169	0,96338	0,48169	2,59	0,00480	0,99520	0,99040	0,49520
2,10	0,01786	0,98214	0,96427	0,48214	2,60	0,00466	0,99534	0,99068	0,49534
2,11	0,01743	0,98257	0,96514	0,48257	2,61	0,00453	0,99547	0,99095	0,49547
2,12	0,01700	0,98300	0,96599	0,48300	2,62	0,00440	0,99560	0,99121	0,49560
2,13	0,01659	0,98341	0,96683	0,48341	2,63	0,00427	0,99573	0,99146	0,49573
2,14	0,01618	0,98382	0,96765	0,48382	2,64	0,00415	0,99585	0,99171	0,49585
2,15	0,01578	0,98422	0,96844	0,48422	2,65	0,00402	0,99598	0,99195	0,49598
2,16	0,01539	0,98461	0,96923	0,48461	2,66	0,00391	0,99609	0,99219	0,49609
2,17	0,01500	0,98500	0,96999	0,48500	2,67	0,00379	0,99621	0,99241	0,49621
2,18	0,01463	0,98537	0,97074	0,48537	2,68	0,00368	0,99632	0,99264	0,49632
2,19	0,01426	0,98574	0,97148	0,48574	2,69	0,00357	0,99643	0,99285	0,49643
2,20	0,01390	0,98610	0,97219	0,48610	2,70	0,00347	0,99653	0,99307	0,49653
2,21	0,01355	0,98645	0,97289	0,48645	2,71	0,00336	0,99664	0,99327	0,49664
2,22	0,01321	0,98679	0,97358	0,48679	2,72	0,00326	0,99674	0,99347	0,49674
2,23	0,01287	0,98713	0,97425	0,48713	2,73	0,00317	0,99683	0,99367	0,49683
2,24	0,01255	0,98745	0,97491	0,48745	2,74	0,00307	0,99693	0,99386	0,49693
2,25	0,01222	0,98778	0,97555	0,48778	2,75	0,00298	0,99702	0,99404	0,49702
2,26	0,01191	0,98809	0,97618	0,48809	2,76	0,00289	0,99711	0,99422	0,49711
2,27	0,01160	0,98840	0,97679	0,48840	2,77	0,00280	0,99720	0,99439	0,49720
2,28	0,01130	0,98870	0,97739	0,48870	2,78	0,00272	0,99728	0,99456	0,49728
2,29	0,01101	0,98899	0,97798	0,48899	2,79	0,00264	0,99736	0,99473	0,49736
2,30	0,01072	0,98928	0,97855	0,48928	2,80	0,00256	0,99744	0,99489	0,49744
2,31	0,01044	0,98956	0,97911	0,48956	2,81	0,00248	0,99752	0,99505	0,49752
2,32	0,01017	0,98983	0,97966	0,48983	2,82	0,00240	0,99760	0,99520	0,49760
2,33	0,00990	0,99010	0,98019	0,49010	2,83	0,00233	0,99767	0,99535	0,49767
2,34	0,00964	0,99036	0,98072	0,49036	2,84	0,00226	0,99774	0,99549	0,49774
2,35	0,00939	0,99061	0,98123	0,49061	2,85	0,00219	0,99781	0,99563	0,49781
2,36	0,00914	0,99086	0,98173	0,49086	2,86	0,00212	0,99788	0,99576	0,49788
2,37	0,00889	0,99111	0,98221	0,49111	2,87	0,00205	0,99795	0,99590	0,49795
2,38	0,00866	0,99134	0,98269	0,49134	2,88	0,00199	0,99801	0,99602	0,49801
2,39	0,00842	0,99158	0,98315	0,49158	2,89	0,00193	0,99807	0,99615	0,49807
2,40	0,00820	0,99180	0,98360	0,49180	2,90	0,00187	0,99813	0,99627	0,49813
2,41	0,00798	0,99202	0,98405	0,49202	2,91	0,00181	0,99819	0,99639	0,49819
2,42	0,00776	0,99224	0,98448	0,49224	2,92	0,00175	0,99825	0,99650	0,49825
2,43	0,00755	0,99245	0,98490	0,49245	2,93	0,00169	0,99831	0,99661	0,49831
2,44	0,00734	0,99266	0,98531	0,49266	2,94	0,00164	0,99836	0,99672	0,49836
2,45	0,00714	0,99286	0,98571	0,49286	2,95	0,00159	0,99841	0,99682	0,49841
2,46	0,00695	0,99305	0,98611	0,49305	2,96	0,00154	0,99846	0,99692	0,49846
2,47	0,00676	0,99324	0,98649	0,49324	2,97	0,00149	0,99851	0,99702	0,49851
2,48	0,00657	0,99343	0,98686	0,49343	2,98	0,00144	0,99856	0,99712	0,49856
2,49	0,00639	0,99361	0,98723	0,49361	2,99	0,00139	0,99861	0,99721	0,49861

ANEXO 26 (d)

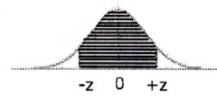
ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL ESTÁNDAR



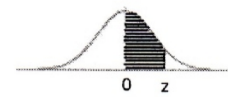
c.chica (z)



c.grande (z)



área central

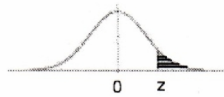


área (0 a z)

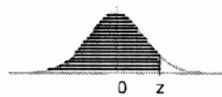
z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)	z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)
3,00	0,00135	0,99865	0,99730	0,49865	3,50	0,00023	0,99977	0,99953	0,49977
3,01	0,00131	0,99869	0,99739	0,49869	3,51	0,00022	0,99978	0,99955	0,49978
3,02	0,00126	0,99874	0,99747	0,49874	3,52	0,00022	0,99978	0,99957	0,49978
3,03	0,00122	0,99878	0,99755	0,49878	3,53	0,00021	0,99979	0,99958	0,49979
3,04	0,00118	0,99882	0,99763	0,49882	3,54	0,00020	0,99980	0,99960	0,49980
3,05	0,00114	0,99886	0,99771	0,49886	3,55	0,00019	0,99981	0,99961	0,49981
3,06	0,00111	0,99889	0,99779	0,49889	3,56	0,00019	0,99981	0,99963	0,49981
3,07	0,00107	0,99893	0,99786	0,49893	3,57	0,00018	0,99982	0,99964	0,49982
3,08	0,00104	0,99896	0,99793	0,49896	3,58	0,00017	0,99983	0,99966	0,49983
3,09	0,00100	0,99900	0,99800	0,49900	3,59	0,00017	0,99983	0,99967	0,49983
3,10	0,00097	0,99903	0,99806	0,49903	3,60	0,00016	0,99984	0,99968	0,49984
3,11	0,00094	0,99906	0,99813	0,49906	3,61	0,00015	0,99985	0,99969	0,49985
3,12	0,00090	0,99910	0,99819	0,49910	3,62	0,00015	0,99985	0,99971	0,49985
3,13	0,00087	0,99913	0,99825	0,49913	3,63	0,00014	0,99986	0,99972	0,49986
3,14	0,00084	0,99916	0,99831	0,49916	3,64	0,00014	0,99986	0,99973	0,49986
3,15	0,00082	0,99918	0,99837	0,49918	3,65	0,00013	0,99987	0,99974	0,49987
3,16	0,00079	0,99921	0,99842	0,49921	3,66	0,00013	0,99987	0,99975	0,49987
3,17	0,00076	0,99924	0,99848	0,49924	3,67	0,00012	0,99988	0,99976	0,49988
3,18	0,00074	0,99926	0,99853	0,49926	3,68	0,00012	0,99988	0,99977	0,49988
3,19	0,00071	0,99929	0,99858	0,49929	3,69	0,00011	0,99989	0,99978	0,49989
3,20	0,00069	0,99931	0,99863	0,49931	3,70	0,00011	0,99989	0,99978	0,49989
3,21	0,00066	0,99934	0,99867	0,49934	3,71	0,00010	0,99990	0,99979	0,49990
3,22	0,00064	0,99936	0,99872	0,49936	3,72	0,00010	0,99990	0,99980	0,49990
3,23	0,00062	0,99938	0,99876	0,49938	3,73	0,00010	0,99990	0,99981	0,49990
3,24	0,00060	0,99940	0,99880	0,49940	3,74	0,00009	0,99991	0,99982	0,49991
3,25	0,00058	0,99942	0,99885	0,49942	3,75	0,00009	0,99991	0,99982	0,49991
3,26	0,00056	0,99944	0,99889	0,49944	3,76	0,00008	0,99992	0,99983	0,49992
3,27	0,00054	0,99946	0,99892	0,49946	3,77	0,00008	0,99992	0,99984	0,49992
3,28	0,00052	0,99948	0,99896	0,49948	3,78	0,00008	0,99992	0,99984	0,49992
3,29	0,00050	0,99950	0,99900	0,49950	3,79	0,00008	0,99992	0,99985	0,49992
3,30	0,00048	0,99952	0,99903	0,49952	3,80	0,00007	0,99993	0,99986	0,49993
3,31	0,00047	0,99953	0,99907	0,49953	3,81	0,00007	0,99993	0,99986	0,49993
3,32	0,00045	0,99955	0,99910	0,49955	3,82	0,00007	0,99993	0,99987	0,49993
3,33	0,00043	0,99957	0,99913	0,49957	3,83	0,00006	0,99994	0,99987	0,49994
3,34	0,00042	0,99958	0,99916	0,49958	3,84	0,00006	0,99994	0,99988	0,49994
3,35	0,00040	0,99960	0,99919	0,49960	3,85	0,00006	0,99994	0,99988	0,49994
3,36	0,00039	0,99961	0,99922	0,49961	3,86	0,00006	0,99994	0,99989	0,49994
3,37	0,00038	0,99962	0,99925	0,49962	3,87	0,00005	0,99995	0,99989	0,49995
3,38	0,00036	0,99964	0,99928	0,49964	3,88	0,00005	0,99995	0,99990	0,49995
3,39	0,00035	0,99965	0,99930	0,49965	3,89	0,00005	0,99995	0,99990	0,49995
3,40	0,00034	0,99966	0,99933	0,49966	3,90	0,00005	0,99995	0,99990	0,49995
3,41	0,00032	0,99968	0,99935	0,49968	3,91	0,00005	0,99995	0,99991	0,49995
3,42	0,00031	0,99969	0,99937	0,49969	3,92	0,00004	0,99996	0,99991	0,49996
3,43	0,00030	0,99970	0,99940	0,49970	3,93	0,00004	0,99996	0,99992	0,49996
3,44	0,00029	0,99971	0,99942	0,49971	3,94	0,00004	0,99996	0,99992	0,49996
3,45	0,00028	0,99972	0,99944	0,49972	3,95	0,00004	0,99996	0,99992	0,49996
3,46	0,00027	0,99973	0,99946	0,49973	3,96	0,00004	0,99996	0,99993	0,49996
3,47	0,00026	0,99974	0,99948	0,49974	3,97	0,00004	0,99996	0,99993	0,49996
3,48	0,00025	0,99975	0,99950	0,49975	3,98	0,00003	0,99997	0,99993	0,49997
3,49	0,00024	0,99976	0,99952	0,49976	3,99	0,00003	0,99997	0,99993	0,49997

ANEXO 26 (e)

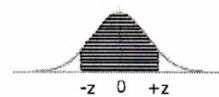
ÁREAS BAJO LA CURVA NORMAL ESTÁNDAR



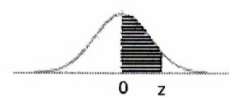
c.chica (z)



c.grande (z)



área central



área (0 a z)

z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)	z	c.chica (z)	c.grande (z)	área central	área (0 a z)
4,00	0,00003	0,99997	0,99994	0,49997	4,25	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,01	0,00003	0,99997	0,99994	0,49997	4,26	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,02	0,00003	0,99997	0,99994	0,49997	4,27	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,03	0,00003	0,99997	0,99994	0,49997	4,28	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,04	0,00003	0,99997	0,99995	0,49997	4,29	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,05	0,00003	0,99997	0,99995	0,49997	4,30	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,06	0,00002	0,99998	0,99995	0,49998	4,31	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,07	0,00002	0,99998	0,99995	0,49998	4,32	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999
4,08	0,00002	0,99998	0,99995	0,49998	4,33	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,09	0,00002	0,99998	0,99996	0,49998	4,34	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,10	0,00002	0,99998	0,99996	0,49998	4,35	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,11	0,00002	0,99998	0,99996	0,49998	4,36	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,12	0,00002	0,99998	0,99996	0,49998	4,37	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,13	0,00002	0,99998	0,99996	0,49998	4,38	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,14	0,00002	0,99998	0,99997	0,49998	4,39	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,15	0,00002	0,99998	0,99997	0,49998	4,40	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,16	0,00002	0,99998	0,99997	0,49998	4,41	0,00001	0,99999	0,99999	0,49999
4,17	0,00002	0,99998	0,99997	0,49998	4,42	0,00000	1,00000	0,99999	0,50000
4,18	0,00001	0,99999	0,99997	0,49999	4,43	0,00000	1,00000	0,99999	0,50000
4,19	0,00001	0,99999	0,99997	0,49999	4,44	0,00000	1,00000	0,99999	0,50000
4,20	0,00001	0,99999	0,99997	0,49999					
4,21	0,00001	0,99999	0,99997	0,49999					
4,22	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999					
4,23	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999					
4,24	0,00001	0,99999	0,99998	0,49999					

ANEXO 27

NORMA PARA MEDIR ADHERENCIA CON CINTA ADHESIVA

MMP. MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES

M-MMP-2-07-010/01

G. DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA DE LA PINTURA MEDIANTE CINTA ADHESIVA

G.1. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

Previo al inicio de la prueba se verifica que el laboratorio esté bien ventilado, con temperatura comprendida entre $25 \pm 1^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $50 \pm 5\%$, evitando el polvo y corrientes de aire y se procede de la siguiente manera:

- G.1.1. Se preparan los paneles de prueba según lo indicado en los Incisos F.1.1. a F.1.3. de este Manual, pero considerando los espesores indicados en la Tabla 2 de este Manual.

TABLA 2.- Condiciones para los paneles de prueba

Tipo de pintura	Espesor de película seca mm (mils)	Separación entre cortes mm	Tiempo para la prueba, después del curado h
Primario	0,0580 a 0,0762 (2,0 a 3,0)	2,0	168
Acabado	0,0580 a 0,1160 (2,0 a 4,0)	2,0	72

- G.1.2. Inmediatamente después de transcurrido el tiempo establecido para efectuar la prueba después del curado indicado en la Tabla 2 de este Manual, con un peine de cuchillas o con ayuda de una regla metálica y una navaja rígida y afilada, se hacen 6 cortes perpendiculares entre sí para formar una cuadrícula de 25 cuadros, asegurándose de que todos los cortes lleguen hasta la superficie del panel sin penetrarlo. Cuando se prueben capas sencillas de pintura para primario o acabado, el espesor de la capa de pintura y la separación entre cortes será la indicada en la Tabla 2; para espesores de película en sistemas de pintura con primario y acabado con espesor promedio total entre 0,1524 y 0,2540 mm (6 y 10 mils), la separación entre cortes será de 3 mm.
- G.1.3. Una vez terminados los cortes en cuadrícula, se cepilla vigorosamente la superficie del panel, a fin de eliminar el material removido al hacer los cortes, procediendo a fijar una cinta adhesiva sobre la cuadrícula y cubriendo totalmente los 25 cuadros.
- G.1.4. Con objeto de asegurar la buena adherencia de la cinta sobre la cuadrícula y expulsar el aire atrapado, con el dedo pulgar o con una goma de borrar, se frota de 10 a 15 veces ejerciendo presión sobre la cinta en contacto con la cuadrícula, procurando cubrir con la cinta 20 mm más a cada lado de dicha cuadrícula.
- G.1.5. A continuación, los extremos de la cinta adhesiva se doblan hacia arriba formando una asa de tal manera que se pueda tirar de ella en forma perpendicular al panel. Sujetándola firmemente, de una vez se arranca la cinta y se evalúa la cantidad de pintura que permanece adherida al panel.
- G.1.6. La prueba se hace en dos lugares distintos del panel de prueba a fin de verificar la adherencia.

G.2. CÁLCULOS Y RESULTADOS

Se reporta como resultado de la prueba, el porcentaje de pintura que permanece adherida al sustrato. El reporte contendrá además, la identificación de la pintura bajo prueba, preparación de la superficie del panel, espesor de la película seca de pintura aplicada en mm y cualquier variación en el procedimiento de prueba.

H. PRECAUCIONES PARA EVITAR ERRORES

Para evitar errores durante la ejecución de la prueba, se observarán las siguientes precauciones:

- H.1. Realizar la prueba en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corrientes de aire, de cambios de temperatura y de partículas que provoquen la contaminación de las muestras de prueba.

- H.2. Verificar que las condiciones de temperatura y humedad en el laboratorio al momento de realizar la prueba sean las indicadas en las Fracciones F.1. y G.1. de este Manual.
- H.3. En pinturas de dos componentes, cuidar que la preparación de la pintura se realice de acuerdo con lo indicado en la Fracción E.2. de este Manual.
- H.4. Verificar que el espesor de la película aplicada en los paneles y las condiciones de secado y curado, cumplan con lo indicado en las Tablas 1 y 2 de este Manual, según corresponda.
- H.5. Cuidar que todo el equipo esté perfectamente limpio, para que al hacer la prueba la pintura no se mezcle con agentes extraños y se altere el resultado, especialmente los paneles donde se aplicará la pintura.

I. CONCORDANCIA CON OTRAS NORMAS

NORMAS	DESIGNACIÓN
Standard Method for Measuring Adhesion by Tape Test	ASTM D - 3359
Standard Method for Adhesion of Organic Coatings	ASTM D - 2197

FUENTE: LIBRO.- MMP.MÉTODOS DE
MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES
(<http://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-2-07-010-01.pdf>)

Cortador de trama cruzada

Elcometer 107

Con el cortador de trama cruzada Elcometer 107 se puede hacer una evaluación instantánea de la calidad de unión al sustrato. Debido a su robusta construcción, este medidor es ideal para revestimientos finos, gruesos o duros sobre todas las superficies. Ideal para pruebas en campo o laboratorio.

- Diseño robusto
- Mango grande y antideslizante
- Ideal para revestimientos finos, gruesos o duros
- Cortador de 4 lados, de fácil cambio, para pruebas de adherencia en un amplio margen de espesores de revestimiento (1, 1.5, 2 y 3 mm)



NORMAS:

AS 3894.9, AS 1580.408.4,
ASTM D 3359-B, BS 3900-E6,
ECCA T6, EN 13523-6, ISO 2409,
ISO 16276-2, JIS K 5600-5-6,
NF T30-038

El cortador de trama cruzada Elcometer 107 se suministra como kit básico o kit completo.

Características Técnicas

Referencia	Descripción	Espesor del revestimiento		Certificado
F10713222-1	Kit básico Elcometer 107 (6 x 1 mm)	0 - 60µm	0 - 2.0mils	○
F10713348-6	Kit completo Elcometer 107 con cinta ISO (6 x 1 mm)	0 - 60µm	-	○
F10713348-1	Kit completo Elcometer 107 con cinta ASTM (6 x 1 mm)	0 - 50µm	0 - 2.0mils	○
F10713222-2	Kit básico Elcometer 107 (11 x 1 mm)	0 - 50µm	0 - 2.0mils	○
F10713348-2	Kit completo Elcometer 107 con cinta ASTM (11 x 1 mm)	0 - 50µm	0 - 2.0mils	○
F10713222-3	Kit básico Elcometer 107 (11 x 1.5 mm)	-	-	○
F10713222-4	Kit básico Elcometer 107 (6 x 2 mm)	0 - 125µm	0 - 5.0mils	○
F10713348-9	Kit completo Elcometer 107 con cinta ISO (6 x 2 mm)	0 - 120µm	-	○
F10713348-4	Kit completo Elcometer 107 con cinta ASTM (6 x 2 mm)	50 - 125µm	2.0 - 5.0mils	○
F10713222-5	Kit básico Elcometer 107 (6 x 3 mm)	121 - 250µm	-	○
Lista de empaque	Kit básico: Mango robusto, cortador, llave de tuercas hexagonal, estuche de almacenamiento de presentación e instrucciones (junto con tarjeta de Clasificación de Resultados de la Prueba de Adherencia) Kit completo: Mango robusto, cortador, llave de tuercas hexagonal, instrucciones (junto con tarjeta de Clasificación de Resultados de la Prueba de Adherencia), lupa, cepillo y cinta adhesiva (cinta ASTM o ISO), todo en un maletín de transporte ABS de plástico			

Accesorios

Referencia	Descripción	Métodos			Certificado
		ISO	ASTM	AS	
T99913700-1	6 x 1 mm Cuchilla con cuatro lados	•			○
T99913700-2	11 x 1 mm Cuchilla con cuatro lados		•		○
T99913700-3	11 x 1.5 mm Cuchilla con cuatro lados	•			○
T99913700-4	6 x 2 mm Cuchilla con cuatro lados	•	•		○
T99913700-5	6 x 3 mm Cuchilla con cuatro lados	•			○
K0001539M001	Cinta adhesiva (1 rollo) ASTM D 3359		•		
K0001539M002	Cinta adhesiva (1 rollo) ISO 2409	•			
T9998894-	Cinta adhesiva (2 rollos) ASTM D 3359		•		
T9999358-	Cinta adhesiva (2 rollos) ISO 2409	•			

○ Certificado de Calibración Opcional disponible.

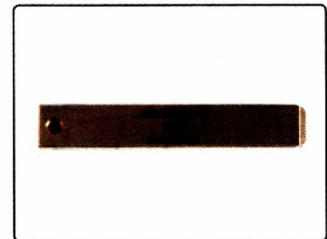
Cortador de trama cruzada

Elcometer 1540

El Elcometer 1540 es un instrumento sencillo para la determinación rápida de la adherencia de una gran variedad de pinturas de hasta 50 μm (2 mil) de espesor.

Hecho de acero, tiene 11 dientes en cuña con espaciado de 1mm. El procedimiento consiste en hacer dos juegos de líneas que se cortan en ángulo recto para obtener una trama de 100 cuadrados.

Los resultados se determinan con la tabla aquí debajo.



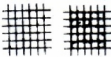





Características Técnicas

C

Referencia	Descripción	Certificado
K0001540M001	Medidor de cortes cruzados Elcometer 1540 (11 x 1mm)	

Clasificación de los resultados de la prueba de trama cruzada

Superficie	Descripción típica de los resultados	ISO	ASTM
	Los bordes de los cortes aparecen completamente suaves y ninguno de los cuadrados de trama se separa.	0	5B
	Desprendimiento de pequeñas escamas del revestimiento en las intersecciones de los cortes. Aparece afectada una superficie del entramado no significativamente mayor del 5%.	1	4B
	El revestimiento se ha descascarillado a lo largo de los bordes y/o en las intersecciones de los cortes. Aparece afectada una superficie del entramado significativamente mayor del 5%, pero no significativamente superior al 15%.	2	3B
	El revestimiento se ha descascarillado a lo largo de los bordes de los cortes parcial o totalmente en cintas anchas y/o parcial o totalmente en distintas partes de los cuadrados. Aparece afectada una superficie del entramado significativamente mayor del 15%, pero no significativamente superior al 35%.	3	2B
	El revestimiento se ha descascarillado a lo largo de los bordes de los cortes en cintas anchas y/o hay algunos cuadrados en los que el desprendimiento se produce parcial o totalmente. Aparece afectada una superficie del entramado significativamente mayor del 35%, pero no significativamente superior al 65%.	4	1B
	Cualquier clase de desprendimiento que no pueda clasificarse incluso por la clasificación 4 (1B).	5	0B

Las imágenes y descripciones se basan en la información publicada en ISO2409 y ASTM D 3559-B

 Certificado de Calibración Opcional disponible.